



Faculté d'éducation

École doctorale « Cognition, Langage, Interaction » (EA 4004)

**Influence des traitements graphomoteurs sur la production orthographique de
mots isolés chez des élèves francophones du primaire**

Par

Érika Simard-Dupuis

Thèse présentée en cotutelle

en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)

en éducation (Université de Sherbrooke) et en psychologie (Université Paris 8)

Décembre 2019

© Érika Simard-Dupuis, 2019

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
UNIVERSITÉ PARIS 8

Faculté d'éducation
École doctorale « Cognition, Langage, Interaction » (EA 4004)

**Influence des traitements graphomoteurs sur la production orthographique de
mots isolés chez des élèves francophones du primaire**

Érika Simard-Dupuis

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Marie-France Morin	Directrice de recherche (Université de Sherbrooke)
Denis Alamargot	Directeur de recherche (Université Paris-Est Créteil)
Gerardo Restrepo	Examineur interne (Université de Sherbrooke)
Jessica Guilbert	Examinatrice interne et rapporteure (Université Paris-Est Créteil)
Nathalie Bonneton-Botté	Examinatrice externe et rapporteure (Université de Bretagne Occidentale)

SOMMAIRE

Cette recherche doctorale, inscrite dans le champ de la psychologie cognitive, avait pour objectif d'évaluer l'influence des traitements graphomoteurs sur les traitements orthographiques au cours de la production écrite de mots isolés chez des scripteurs francophones du primaire. Trois études ont été menées dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996) afin de confirmer et de préciser la nature de cet effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe lexicale.

La première étude cherchait à déterminer si une augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice accentue le nombre d'erreurs orthographiques produites lors de l'écriture de mots isolés, ce d'autant plus que les ressources cognitives mobilisées par les traitements orthographiques sont élevées. Pour ce faire, il a été demandé à 118 élèves français de troisième année (CE2) de produire sous dictée 20 mots en lettres minuscules (cursives) et 20 autres mots en lettres majuscules (scriptes), variant en fréquence et en consistance. Les résultats montrent que le pourcentage de mots erronés augmente significativement lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules. Cet effet ne se retrouve que pour les mots fréquents.

Ces premiers résultats ont été validés et précisés lors d'une deuxième étude. Cette dernière cherchait à déterminer si la compétition qui s'exerce entre les processus graphomoteurs et les processus orthographiques pour l'attribution des ressources cognitives limitées de la mémoire de travail conduit non seulement à la production d'erreurs, mais aussi à un ralentissement dans le décours des traitements. Pour ce faire, il a été demandé à 48 élèves français de troisième année (CE2) de produire sous dictée 40 mots tant en lettres minuscules (cursives) qu'en lettres majuscules (scriptes), variant en fréquence et en consistance. Les résultats montrent, d'une part, que la durée de production par lettre est significativement plus élevée lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules, indépendamment de leurs caractéristiques lexicales et sous-lexicales. D'autre part, ils montrent que le pourcentage d'erreurs graphémiques – qui tient compte du nombre d'erreurs commises dans

chaque mot – est significativement plus élevé lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules, ce d’autant plus qu’ils sont inconsistants.

Afin d’augmenter la validité écologique de ces résultats, le coût cognitif des traitements graphomoteurs a été manipulé, au cours de la troisième étude, par le niveau scolaire des élèves. Cette dernière étude visait deux objectifs. Le premier était de décrire et de comparer les performances graphomotrices d’élèves francophones du primaire à des niveaux différents d’acquisition et de procéduralisation des programmes moteurs. Pour ce faire, les performances graphomotrices de 69 élèves québécois de première (CP), troisième (CE2) et cinquième (CM2) années ont été évaluées au moyen du rappel écrit du prénom et des cinq premières lettres de l’alphabet (ABCDE), tant sur le plan de la qualité du tracé que sur celui des caractéristiques spatio-temporelles des mouvements d’écriture. Les résultats montrent que le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique ne varie pas entre les niveaux, alors que la taille des lettres et leur durée de production (mouvement et/ou pauses) atteignent, indépendamment de la tâche, un plateau en mi-parcours de l’école primaire. Les performances graphomotrices des élèves sont par ailleurs meilleures à la tâche du prénom qu’à celle de l’ABCDE. Ce résultat conforte, à la lumière du modèle ACT d’Anderson (1983), l’interprétation d’une mise en place et d’une procéduralisation plus précoces des programmes moteurs (i.e. mécanisme de *chunking*) pour des lettres tracées et/ou enchaînées plus fréquemment, telles que celles du prénom.

Le second objectif cherchait à déterminer si le coût cognitif des traitements graphomoteurs a un effet sur le nombre d’erreurs orthographiques et le décours temporel de l’écriture, lorsque les mots exigent un maintien plus ou moins prolongé au sein du *buffer* graphémique. Pour ce faire, il a été demandé aux élèves de réaliser une tâche de rappel immédiat écrit de 12 mots fréquents variant en longueur (4 vs 8 lettres). Les résultats montrent que le pourcentage d’erreurs graphémiques et la durée des pauses par lettre sont significativement plus élevés chez les élèves de première année que chez ceux de troisième et cinquième années, ce d’autant plus que les mots sont longs.

Dans l'ensemble, les résultats de cette recherche doctorale montrent une diminution de la réussite orthographique quand les ressources cognitives mobilisées par les traitements graphomoteurs sont élevées (Fayol et Miret, 2005; Pontart et al., 2013). Plus spécifiquement, une augmentation du coût cognitif des traitements graphomoteurs lors de la production écrite de mots isolés capte les ressources cognitives disponibles pour le maintien et le rafraîchissement des représentations orthographiques maintenues temporairement actives dans le *buffer* graphémique, où elles subissent un déclin temporel.

À notre connaissance, cette recherche doctorale est la première à montrer que l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur la réussite orthographique se localise au niveau du *buffer* graphémique, une instance mémorielle située à l'interface entre les processus centraux et les processus périphériques de l'écriture (cf. De Partz, 2018). Sur le plan pratique, les résultats obtenus soulignent la nécessité des interventions éducatives précoces visant l'automatisation des programmes moteurs, afin de réduire le coût cognitif des traitements graphomoteurs au profit des traitements orthographiques.

Mots-clés : graphomotricité (*handwriting*), orthographe lexicale (*lexical spelling*), coût cognitif (*cognitive load*), effet *bottom-up* (*bottom-up effect*), *buffer* graphémique (*graphemic buffer*), mémoire de travail (*working memory*).

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvi
REMERCIEMENTS.....	xix
INTRODUCTION	1
PREMIER CHAPITRE – PROBLÉMATIQUE	7
1. IMPORTANCE DE L'ÉCRIT DANS LA SOCIÉTÉ.....	7
2. ORIENTATIONS MINISTÉRIELLES AU QUÉBEC ET EN FRANCE AU REGARD DE LA PRODUCTION ÉCRITE.....	8
2.1 La production de textes à l'école primaire : enjeux et attentes	9
2.2 La graphomotricité dans les programmes d'études au Québec et en France	10
2.3 Décalage entre les orientations ministérielles et les savoirs issus de la recherche au sujet de la graphomotricité	12
3. COÛT COGNITIF DE LA GRAPHOMOTRICITÉ ET DE L'ORTHOGRAPHE DANS L'ACTIVITÉ DE PRODUCTION ÉCRITE.....	16
3.1 Coût cognitif des traitements orthographiques en production écrite.....	16
3.2 Coût cognitif des traitements graphomoteurs en production écrite.....	17
4. RELATIONS ENTRE LES HABILÉTÉS GRAPHOMOTRICES ET ORTHOGRAPHIQUES	19
5. ÉTAT DE L'ART SUR L'IMPORTANCE DE LA GRAPHOMOTRICITÉ DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION ÉCRITE	22
6. PROBLÈME DE RECHERCHE ET QUESTIONS PRÉLIMINAIRES	23
DEUXIÈME CHAPITRE – CADRE DE RÉFÉRENCE.....	25
1. DÉVELOPPEMENT DE LA GRAPHOMOTRICITÉ.....	25
1.1 Modélisation de la production écrite des experts d'après Van Galen (1991)	25
1.1.1 Représentations orthographiques et <i>buffer</i> graphémique	27
1.1.2 Traitements constitutifs de la programmation graphomotrice	27
1.2 Évolution des habiletés graphomotrices : qualité et dynamique du tracé	30
1.2.1 Vue d'ensemble du développement de la « motricité graphique » selon De Ajuriaguerra, Auzias et Denner (1971)	30

1.2.2 Amélioration de la qualité du tracé	32
1.2.3 Amélioration des caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur	33
1.3 Facteurs explicatifs des changements développementaux : entre maturation, contraintes et stratégies	37
1.3.1 Distalisation progressive du mouvement	37
1.3.2 Passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif du mouvement d'écriture	38
1.3.3 Passage d'un contrôle visuel à un contrôle proprioceptif du mouvement d'écriture	39
1.3.4 Modèles internes de l'action et anticipation motrice	41
1.4 Proposition de formalisation du développement graphomoteur à partir du modèle ACT d'Anderson (1983)	44
1.4.1 Connaissances déclaratives et procédurales	45
1.4.2 Acquisition des habiletés complexes en trois stades	47
1.4.2.1 Stade déclaratif	48
1.4.2.2 Stade de compilation	48
1.4.2.3 Stade de <i>tuning</i>	50
1.4.2.4 Mobilisation de connaissances déclaratives et procédurales au sein d'une même tâche	50
1.4.3 Automatisation des connaissances procédurales et mécanisme de <i>chunking</i> ..	52
1.4.4 Rôle et conceptions de la mémoire de travail	54
1.4.4.1 Structure et fonctionnement dans les modèles d'activation	54
1.4.4.2 Contrainte capacitaire	55
1.4.5 Hypothèse générale sur le développement des habiletés graphomotrices en trois « phases temporelles » menant à une automatisation des programmes moteurs	56
2. DÉVELOPPEMENT DE L'ORTHOGRAPHE LEXICALE	62
2.1 Opacité du système orthographique français	62
2.2 Relations entre la lecture et l'orthographe	64
2.3 Modèle à double voie en production écrite de mots	65
2.3.1 Voie phonologique	65

2.3.2	Voie lexicale.....	66
2.3.3	Relative indépendance des voies.....	66
2.3.4	Convergence du produit des voies au niveau du <i>buffer</i> graphémique.....	66
2.4	État de l’art sur le développement des compétences en orthographe et l’automatisation des correspondances phonème-graphème	70
3.	GESTION EN TEMPS RÉEL DES TRAITEMENTS GRAPHOMOTEURS ET ORTHOGRAPHIQUES	71
3.1	Traitements sériel et parallèle en production écrite de mots	72
3.2	Déterminants de la réussite et de la vitesse en production écrite de mots.....	73
3.2.1	Effet de la régularité ou de la consistance des mots.....	73
3.2.2	Effet de la lexicalité.....	78
3.2.3	Effet de la fréquence des mots	78
3.2.4	Effet de la longueur des mots	80
3.3	Une intégration des représentations graphomotrices et orthographiques au sein d’un même <i>chunk</i> ?	84
4.	VERS L’EXPÉRIMENTATION	85
5.	PRINCIPES GÉNÉRAUX APPLIQUÉS POUR LES TROIS ÉTUDES	91
5.1	Critères d’inclusion des participants	91
5.2	Conditions d’application des tests statistiques	92
TROISIÈME CHAPITRE – ÉTUDE 1		94
1.	FONDEMENTS THÉORIQUES	94
2.	OBJECTIF DE RECHERCHE.....	96
2.1	Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice.....	96
2.2	Variation de la complexité des traitements orthographiques	99
3.	MÉTHODOLOGIE	102
3.1	Participants	102
3.2	Tâches.....	102
3.2.1	Tâches d’inclusion.....	102
3.2.2	Tâche graphomotrice.....	104
3.2.3	Tâche expérimentale	104

3.3 Matériel	104
3.4 Procédure.....	106
3.4.1 Ordre de passation des tâches.....	106
3.4.2 Contrôles méthodologiques.....	107
3.4.3 Consignes	108
3.4.3.1 Consigne pour la tâche graphomotrice.....	108
3.4.3.2 Consigne pour la tâche expérimentale	108
3.5 Variables mesurées.....	109
3.5.1 Mesures pour les tâches d'inclusion.....	109
3.5.2 Mesure pour la tâche graphomotrice	110
3.5.3 Mesure pour la tâche expérimentale.....	110
4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	111
4.1 Statistiques descriptives des tâches d'inclusion	111
4.2 Effet de l'Allographe de production sur la fluence de production graphomotrice à la tâche graphomotrice	112
4.3 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale.....	112
4.3.1 Effet de la Fréquence des mots	113
4.3.2 Effet de la Consistance des mots.....	113
4.3.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots.....	113
4.3.4 Effet de l'Allographe de production.....	114
4.3.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots	114
4.3.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots	115
4.3.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots.....	115
5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	115
5.1 Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice : validation du facteur Allographe de production à la tâche graphomotrice	116

5.2	Variation de la complexité des traitements orthographiques à la tâche expérimentale	118
5.3	Relations entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques à la tâche expérimentale	118
6.	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	122
7.	LIMITES DE L'ÉTUDE	123
	QUATRIÈME CHAPITRE – ÉTUDE 2	124
1.	FONDEMENTS THÉORIQUES	124
2.	OBJECTIF DE RECHERCHE.....	125
3.	MÉTHODOLOGIE	127
3.1	Participants	127
3.2	Tâches.....	127
3.2.1	Tâches d'inclusion.....	127
3.2.2	Tâche graphomotrice.....	127
3.2.3	Tâche expérimentale	128
3.3	Matériel	128
3.4	Procédure.....	129
3.4.1	Ordre de passation des tâches.....	129
3.4.2	Contrôles méthodologiques.....	131
3.4.3	Consignes	131
3.4.3.1	Consigne pour la tâche graphomotrice.....	131
3.4.3.2	Consigne pour la tâche expérimentale	131
3.5	Variables mesurées.....	132
3.5.1	Mesures pour les tâches d'inclusion.....	132
3.5.2	Mesure pour la tâche graphomotrice.....	133
3.5.3	Mesures pour la tâche expérimentale	133
4.	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	134
4.1	Statistiques descriptives des tâches d'inclusion	134
4.2	Effet de l'Allographe de production sur la durée de production par lettre à la tâche graphomotrice.....	135

4.3 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur la durée de production par lettre à la tâche expérimentale	135
4.3.1 Effet de la Fréquence des mots	137
4.3.2 Effet de la Consistance des mots	137
4.3.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots	137
4.3.4 Effet de l'Allographe de production	137
4.3.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots	137
4.3.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots	138
4.3.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots	138
4.4 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale	138
4.4.1 Effet de la Fréquence des mots	138
4.4.2 Effet de la Consistance des mots	138
4.4.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots	139
4.4.4 Effet de l'Allographe de production	139
4.4.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots	140
4.4.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots	140
4.4.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots	140
4.5 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage d'erreurs graphémiques à la tâche expérimentale	141
4.5.1 Effet de la Fréquence des mots	141
4.5.2 Effet de la Consistance des mots	141
4.5.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots	141
4.5.4 Effet de l'Allographe de production	142
4.5.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots	142

4.5.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots	142
4.5.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots	143
5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	143
5.1 Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice : validation du facteur Allographe de production à la tâche graphomotrice	144
5.2 Variation de la complexité des traitements orthographiques à la tâche expérimentale	145
5.3 Relations entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques à la tâche expérimentale	147
5.3.1 Durée de production par lettre.....	147
5.3.2 Pourcentage de mots erronés.....	147
5.3.3 Pourcentage d'erreurs graphémiques	150
6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	151
7. LIMITES DE L'ÉTUDE	151
CINQUIÈME CHAPITRE – ÉTUDE 3	155
1. FONDEMENTS THÉORIQUES	155
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	156
3. MÉTHODOLOGIE	161
3.1 Participants	161
3.2 Tâches.....	162
3.2.1 Tâches d'inclusion.....	162
3.2.2 Tâches graphomotrices.....	163
3.2.3 Tâche expérimentale	163
3.3 Matériel	163
3.4 Procédure.....	165
3.4.1 Ordre de passation des tâches.....	166
3.4.1.1 Ordre de passation des tâches en première année	166
3.4.1.2 Ordre de passation des tâches en troisième et cinquième années	166
3.4.2 Contrôles méthodologiques.....	167

3.4.3 Consignes	167
3.4.3.1 Consignes pour les tâches graphomotrices.....	167
3.4.3.2 Consigne pour la tâche expérimentale	168
3.5 Variables mesurées	168
3.5.1 Mesures pour les tâches d'inclusion.....	168
3.5.2 Mesures pour les tâches graphomotrices.....	169
3.5.3 Mesures pour la tâche expérimentale	170
4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	170
4.1 Statistiques descriptives des tâches d'inclusion	171
4.2 Effets de la Tâche et du Niveau sur les mesures des tâches graphomotrices	173
4.2.1 Pourcentage de lettres conformes au modèle allographique	173
4.2.2 Longueur du tracé par lettre	174
4.2.3 Durée de production par lettre.....	174
4.2.4 Durée de mouvement par lettre	175
4.2.5 Durée des pauses par lettre.....	176
4.3 Effets de la Longueur et du Niveau sur le temps d'encodage des mots à la tâche expérimentale	177
4.4 Effets de la Longueur et du Niveau sur la durée d'exécution des mots à la tâche expérimentale	179
4.4.1 Durée de production par lettre.....	179
4.4.2 Durée de mouvement par lettre	180
4.4.3 Durée des pauses par lettre.....	181
4.5 Effets de la Longueur et du Niveau sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale	182
4.6 Effets de la Longueur et du Niveau sur le pourcentage d'erreurs graphémiques à la tâche expérimentale.....	183
5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	184
5.1 Évolution des performances graphomotrices	186
5.1.1 Effet du Niveau sur la qualité du tracé.....	186
5.1.2 Effet du Niveau sur les caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur	189

5.1.3 Effet de la Tâche sur les performances graphomotrices	190
5.2 Évolution du temps d'encodage des mots	192
5.3 Évolution de la durée d'exécution des mots.....	193
5.4 Évolution du nombre d'erreurs orthographiques.....	196
6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	198
7. LIMITES DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	199
SIXIÈME CHAPITRE – DISCUSSION GÉNÉRALE.....	205
CONCLUSION	211
1. RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET PISTES DE RECHERCHE FUTURES	211
2. RETOMBÉES POLITIQUES	216
3. RETOMBÉES ÉDUCATIVES	217
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	220
ANNEXE A – COEFFICIENTS DE CORRÉLATION RECENSÉS DANS LA LITTÉRATURE ENTRE LA GRAPHOMOTRICITÉ ET L'ORTHOGRAPHE LEXICALE	254
ANNEXE B – LISTE DES STIMULI DE L'ÉTUDE 1	258
ANNEXE C – CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES DES STIMULI DE L'ÉTUDE 1	259
ANNEXE D – CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES DES STIMULI DE L'ÉTUDE 2	260
ANNEXE E – LISTE DES STIMULI DE L'ÉTUDE 3 ET CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES	261
ANNEXE F – DÉFINITIONS ET IMAGES DES MOTS AUX ÉTUDES 1 ET 2	262
ANNEXE G – AFFICHE DE RAPPEL POUR L'ALLOGRAPHE DE PRODUCTION AUX ÉTUDES 1 ET 2	270
ANNEXE H – CRITÈRES DE NOTATION POUR LE POURCENTAGE DE LETTRES CONFORMES AU MODÈLE ALLOGRAPHIQUE	271

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Proposition du développement de la graphomotricité en trois «phases temporelles ».....	61
Tableau 2 – Ordre de passation des tâches à l'Étude 1	107
Tableau 3 – Contrebalancement pour la tâche expérimentale à l'Étude 1	108
Tableau 4 – Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 1 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	112
Tableau 5 – Statistiques descriptives pour le pourcentage de mots erronés, en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules), de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 1 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	113
Tableau 6 – Ordre de passation des tâches à l'Étude 2	130
Tableau 7 –Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 2 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	135
Tableau 8 – Statistiques descriptives pour les mesures orthographiques, en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules), de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 2 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	136
Tableau 9 – Ordre de passation des tâches à l'Étude 3	167
Tableau 10 – Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 3 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	172
Tableau 11 – Statistiques descriptives pour les mesures graphomotrices, en fonction de la Tâche (ABCDE/Prénom) et du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) à l'Étude 3 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum	173
Tableau 12 – Statistiques descriptives pour les mesures orthographiques, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum.....	178

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Le modèle de Van Galen (1991)	26
Figure 2 – Cadre général du modèle ACT d’Anderson (1983)	45
Figure 3 – Trois stades d’apprentissage selon le modèle ACT (Kim et al., 2013).....	52
Figure 4 – Illustration du mécanisme de <i>chunking</i> (Anderson, 2000).....	53
Figure 5 – Évolution de la graphomotricité de 5 ans à l’âge adulte (Palmis et al., 2017)...	60
Figure 6 – Processus mobilisés lors de la production écrite de mots isolés (Bonin et al., 2015).....	67
Figure 7 – Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l’Étude 1	114
Figure 8 – Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de l’Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Fréquence des mots (Fréquents/Non-fréquents) à l’Étude 1.....	115
Figure 9 – Dispositif de recueil des mouvements d’écriture à l’Étude 2.....	130
Figure 10 – Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l’Étude 2	139
Figure 11 – Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de l’Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Fréquence des mots (Fréquents/Non-fréquents) à l’Étude 2.....	140
Figure 12 – Évolution du pourcentage d’erreurs graphémiques en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l’Étude 2	142
Figure 13 – Évolution du pourcentage d’erreurs graphémiques en fonction de l’Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Consistance des mots (Consistants/Inconsistants) à l’Étude 2	143
Figure 14 – Exemples de productions orthographiques en fonction de l’Allographe de production (Minuscules/Majuscules) à l’Étude 2.....	150
Figure 15 – Dispositif de recueil des mouvements d’écriture à l’Étude 3.....	165
Figure 16 – Évolution de la durée de production par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l’Étude 3	175
Figure 17 – Évolution de la durée de mouvement par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l’Étude 3	176

Figure 18 – Évolution de la durée des pauses par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l'Étude 3	177
Figure 19 – Évolution du temps d'encodage des mots à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3	179
Figure 20 – Évolution de la durée de production par lettre à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3	180
Figure 21 – Évolution de la durée des pauses par lettre à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3	182
Figure 22 – Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3	183
Figure 23 – Évolution du pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3	184

*À mes parents, avec amour.
Vous m'avez offert le cadeau le plus riche qui soit.*

REMERCIEMENTS

Naturellement, mes premiers remerciements vont à mes directeurs de recherche, Marie-France Morin et Denis Alamargot, qui m'ont constamment poussée au cours de cette aventure à être une meilleure version de moi-même. Marie-France, merci de m'avoir donné l'occasion de faire ma niche au sein de ton équipe, alors que j'en étais à mes premiers pas dans le monde de l'écrit. La passion et la rigueur qui te portent dans tout ce que tu entreprends ont été et demeureront une grande source d'inspiration. Denis, merci de m'avoir initiée à l'univers complexe, mais combien passionnant de la psychologie cognitive. Tes conseils méthodologiques et ton œil avisé ont été essentiels pour mener ce projet de bout en bout. Grâce à votre expertise complémentaire et à votre sens de l'innovation, vous avez fait de ces dernières années de recherche un terrain de jeux et d'apprentissage. J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes.

Un sincère merci aux membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce projet : Nathalie Bonneton-Botté, Jessica Guilbert et Gerardo Restrepo. Merci à Florence Bara pour ses conseils judicieux lors de mon examen de synthèse.

Merci à mes collègues français de l'équipe *Sciences cognitives et éducation* du laboratoire CHArt-UPEC, qui m'ont souvent accompagnée dans les milieux scolaires et avec lesquels j'aurai partagé bon nombre de cafés : Fanny, Jérémy, Jessica, Xavier, Aline, Alban et Jonathan. Je tiens également à remercier, pour les échanges stimulants et les commentaires constructifs, mes collègues québécois de la *Chaire de REcherche sur l'Apprentissage de la Lecture et de l'ECriture chez le jeune enfant* (CREALEC) et de ses séminaires de travail : Pascale, Michèle, Gerardo, Sylvie, Christiane, Andrée, Santiago, Freddy et Julie. Un merci tout particulier à Anne-Marie, qui m'a prise sous son aile dès le début de mes études graduées. J'aurai appris, en te côtoyant, les clés d'un bon équilibre.

Mille fois merci aux enseignants et aux élèves des Académies de Créteil et de Poitiers, ainsi que des Commissions scolaires de Saint-Hyacinthe, des Hauts-Cantons et de la Région-de-Sherbrooke, qui ont si gentiment accepté de participer à mes trois études. Votre engagement, votre curiosité et votre bonne humeur ont donné un sens à chacune des heures

passées sur le terrain... et à chacune de celles consacrées au détournage, à l'extraction et à l'analyse des données temporelles qui ont suivi, rivée à mon écran.

La réalisation de ce projet s'intègre à une recherche plus vaste financée par le *Conseil de recherches en sciences humaines* (CRSH), intitulée « Le rôle des habiletés graphomotrices et orthographiques dans la production de textes chez des élèves francophones du primaire : contraintes et développement » (Morin et Lavoie, 2012-2019). Cette thèse est également adossée au projet e-FRAN « Twictée pour Apprendre l'Orthographe » (TAO) dans lequel est engagée l'Académie de Créteil. Je tiens à souligner le soutien scientifique et financier de la CREALEC, des *Fonds de recherche du Québec – Société et Culture* et *Nature et Technologie* (FRQSC/FRQNT – Programme Frontenac) et de la Région Île-de-France, dont les bourses et allocations de recherche m'auront permis de me concentrer, à temps plein, sur ma thèse.

Merci à mon vélo, le meilleur anti-stress qui soit. Merci à mon adorable Gypsie, ma ronronthérapie. Merci à ma bouffée d'oxygène. Merci pour ta patience, ton ouverture et ton écoute attentive – même si tu faisais (toujours) la sourde oreille quand je te parlais d'Anderson. Tu m'as donné l'élan dont j'avais besoin pour m'accomplir. Merci d'avoir accepté ma désocialisation pour venir à bout de ce projet... et mon humeur qui l'accompagnait. Je serais perdue sans toi. Cliché, mais vrai.

Un merci tout spécial à mes parents qui ont fait de notre éducation leur priorité. Vous m'avez inculqué le sens de l'effort, qui m'aura aidée à traverser l'épaisse couche de brume qui m'empêchait parfois de voir au loin, mais aussi l'humilité et l'indulgence. Il y a beaucoup de vous dans ce que je suis et dans ce que je fais. Robert, merci pour les discussions (enflammées) que nous avons partagées au sujet de l'actualité et de l'éducation un verre à la main. Tu m'auras encouragée toutes ces années, grâce à ta capacité d'argumentation des plus redoutables, à développer mon esprit critique. Carole, merci pour toutes tes lectures, relectures, et re-relectures de mon projet. Personne n'est mieux placé que toi pour constater à quel point cette thèse a évolué depuis sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Tes encouragements incessants, à chacune des étapes franchies et surtout lors des nombreux épisodes de remise en question qui les ont accompagnées, m'ont évité de partir à la dérive. Tu m'as transmis ta

passion pour la recherche, ta volonté, ta logique implacable, ton intégrité, ta plume. Je vous dois, à tous les deux, l'essence et l'esprit de cette thèse.

INTRODUCTION

L'avènement des ordinateurs comme outil pédagogique a récemment amené les acteurs du domaine de l'éducation – parents, enseignants, chercheurs, décideurs politiques – à se questionner sur l'avenir de l'écriture manuscrite et sur la pertinence de maintenir son enseignement à l'école (Mangen, 2018).

Les technologies émergentes pourraient en effet, en raison de leur caractère attractif, susciter davantage que les méthodes traditionnelles la motivation et l'engagement des élèves dans l'apprentissage de la langue écrite (Berninger, Nagy, Tanimoto, Thompson et Abbott, 2015; Bonneton-Botté et al., 2019; Karsenti et Collin, 2013; Patchan et Puranik, 2016). Or, selon le rapport d'une enquête dirigée par l'*Organisation de coopération et de développement économiques* (2015), l'utilisation accrue de dispositifs numériques ne garantit pas l'atteinte d'un niveau de compétence de base en lecture et en production écrite. Les données de cette enquête, recueillies à l'échelle mondiale, ne mettent en évidence qu'une corrélation faible, voire négative, entre le recours aux nouvelles technologies dans l'éducation et la performance à l'écrit des élèves. Les conclusions de ce rapport sont soutenues par différents travaux menés depuis peu en psychologie cognitive, qui montrent que l'écriture manuscrite facilite davantage que l'usage de frappes sur un clavier la reconnaissance et la mémorisation des lettres, en permettant un encodage moteur supplémentaire (James et Engelhardt, 2012; Kiefer, Schuler, Mayer, Trumpp, Hille et Sachse, 2015; Longcamp et al., 2008; Longcamp, Boucard, Gilhodes et Velay, 2006; Longcamp, Zerbato-Poudou et Velay, 2005). Ces études empiriques soulignent le lien entre la perception et l'action : elles montrent que la reconnaissance des lettres se fait par la vue, mais aussi, et comme l'admet la théorie de la cognition incarnée (Longcamp, Lagarrigue et Velay, 2010), par le toucher ou plus exactement par la simulation mentale et souvent inconsciente des mouvements que l'on fait pour écrire ces lettres¹. Dans cet ordre d'idées, des études recourant à l'imagerie cérébrale ont montré

¹ Certains travaux ont aussi montré que l'écriture manuscrite facilitait davantage la discrimination et la reconnaissance des lettres que la visualisation, la copie ou le traçage (Naka, 1998; Zemlock, Vinci-Booher et James, 2018). Écrire à la main supporterait, grâce à la production de formes variables et non stéréotypées, l'établissement ou le renforcement d'une catégorie abstraite des lettres en mémoire plus que n'importe quelle autre activité motrice (Bara, Morin, Alamargot et Bosse, 2016; James, 2017; Li et James, 2016). Ces études

que les représentations visuelle et motrice des lettres étaient intimement liées dans le cerveau, la seule présentation de lettres pouvant activer une zone dans le cortex pré-moteur alors qu'aucune réponse motrice n'est requise, et vice versa (James, 2010, 2017; James et Atwood, 2009; James et Engelhardt, 2012; James et Gauthier, 2006; Kersey et James, 2013; Longcamp, Anton, Roth et Velay, 2003; Longcamp, Velay et Kandel, 2014; cf. Longcamp, Velay, Berninger et Richards, 2016). Ces travaux suggèrent que le recours à l'écriture dactylographique, qui réduit la proprioception et le contrôle moteur, pourrait éventuellement ralentir, voire empêcher la mise en place, dans le cerveau des enfants, des circuits neuronaux engagés dans les activités de lecture et d'orthographe. D'autres études ont montré que l'usage d'un clavier modifiait le processus rédactionnel des scripteurs en affectant la qualité et la longueur de leurs textes et/ou la vitesse à laquelle ceux-ci sont produits (Beers, Mickail, Abbott et Berninger, 2017; Berninger, Abbott, Augsburger et Garcia, 2009; Mangen et Velay, 2010; Preminger, Weiss et Weintraub, 2004; Weigelt-Marom et Weintraub, 2018). L'écriture dactylographique peut en effet, comme l'ont montré Connelly, Gee et Walsh (2007), entraîner un retard de près de deux ans des performances rédactionnelles en l'absence d'un entraînement à l'utilisation du clavier.

L'état des recherches actuelles semble indiquer que l'utilisation d'un ordinateur, même si elle lève certaines contraintes, peut en introduire d'autres sur le plan du langage et de la cognition. Il s'avère donc toujours pertinent de s'intéresser au développement des gestes de l'écriture manuscrite malgré la montée en puissance des technologies (Feng, Lindner, Ji et Joshi, 2017; Lavoie et Boudreau, 2014; Stevenson et Just, 2014).

Le développement de la compétence à écrire, qui représente l'assise sur laquelle les autres apprentissages scolaires vont pouvoir s'intégrer, est particulièrement long et complexe (Morin, Bara et Alamargot, 2017). Cette difficulté tient essentiellement au nombre de

confortent, à l'instar de celles qui ont comparé l'écriture à la main à celle au moyen d'un clavier, l'idée que la graphomotricité est une composante essentielle pour le développement de la lecture et de la production écrite – l'écriture à la main facilitant, sur ce point, l'acquisition de l'orthographe lexicale en comparaison à celle sur ordinateur ou à l'épellation orale (Bosse, Chaves et Valdois, 2014; Cunningham et Stanovich, 1990).

processus de bas niveau (graphomotricité², orthographe) et de haut niveau (élaboration des idées, planification du texte, organisation syntaxique, révision) à gérer simultanément au cours de l'activité, qui sont plus ou moins automatisables et plus ou moins automatisés selon le niveau d'expertise des scripteurs (Alamargot, Lambert et Chanquoy, 2005).

Sur le plan « mécanique », la production écrite est soumise à une maîtrise minimale des correspondances phonème-graphème, ce qui n'est pas simple en français en raison de l'opacité reconnue de la langue, mais aussi à l'élaboration de programmes moteurs (Pérez et Giraudo, 2016). Ces derniers, qui assurent la stabilité des représentations visuelle et motrice des lettres en mémoire à long terme, s'installent vers 9-10 ans (Chartrel et Vinter, 2004) – ce qui permet d'accélérer la vitesse d'écriture – et ne s'automatisent qu'au milieu de l'adolescence, grâce à la maturation du système nerveux et à la pratique (Alamargot et Morin, 2015; Rueckriegel et al., 2008). Selon une conception capacitaire de la mémoire de travail (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), cette automatisation progressive est nécessaire pour libérer des ressources cognitives pour les autres processus impliqués dans la production écrite, comme la planification et la révision du texte (Ferrand, Lété et Thevenot, 2018). Elle permet aux élèves d'appréhender des unités de plus en plus larges (traits → lettres → mots → phrases → paragraphes → texte) et de procéder à des traitements de plus en plus élaborés (Torrance et Galbraith, 2006).

En début de scolarité, le geste graphomoteur requiert un contrôle conscient et consomme une grande partie des ressources cognitives disponibles dans un réservoir attentionnel limité, au détriment des processus de haut niveau, ce qui perturbe l'activité de production écrite (Foulin et Fayol, 1988). De nombreux travaux en psychologie cognitive ont montré que le niveau d'habiletés graphomotrices des élèves était corrélé positivement à la longueur et à la qualité des textes produits (Alves, Branco, Castro et Olive, 2012; Graham, Harris et Fink, 2000; Morin, Lavoie et Montésinos-Gelet, 2012; cf. Kent et Wanzek, 2016). Un constat similaire peut être dressé à l'échelle du mot, bien que les recherches soient moins nombreuses dans ce volet : plus les élèves sont jeunes et moins leurs habiletés

² La graphomotricité, l'équivalent du terme *handwriting* en anglais, renvoie aux processus qui se mettent en place lors de la planification et de la production des gestes posés par un scripteur pour transcrire ses idées.

graphomotrices sont développées, plus le pourcentage d'erreurs dans une tâche de dictée est élevé (Abbott, Berninger et Fayol, 2010; Alves et Limpo, 2015; Bosga-Stork, Bosga, Ellis et Meulenbroek, 2015; Fayol et Miret, 2005; Pontart, Bidet-Ildei, Lambert, Morisset, Flouret et Alamargot, 2013).

Même si la graphomotricité constitue une contrainte cognitive majeure en production écrite (Bourdin, Cogis et Foulin, 2010), son rôle dans la capacité à orthographier correctement des mots est encore sous-estimé dans les politiques éducatives de la France (Ministère de l'éducation nationale, 2015) et du Québec (Gouvernement du Québec, 2001, 2009). Son influence reste également à approfondir dans le milieu de la recherche, puisque les études en psychologie cognitive s'intéressent davantage à l'effet *top-down* des traitements orthographiques sur le déroulement de l'exécution graphomotrice (cf. Olive, 2014). Pourtant, les élèves qui ne maîtrisent pas la composante graphomotrice de l'écriture se trouvent en situation de double tâche : ils doivent gérer l'orthographe des mots tout en programmant et en contrôlant de manière soutenue le geste nécessaire pour tracer et enchaîner les lettres qui les composent. Dans cette perspective, une question se pose : les traitements graphomoteurs, en captant d'importantes ressources cognitives, pourraient-ils entraîner un déclin des performances orthographiques, malgré l'efficacité des procédures phonologique et lexicale? Autrement dit, une part des erreurs d'orthographe commises par les élèves, largement décriées dans les médias³, pourrait-elle être la conséquence d'un « défaut de performance », lié à une limitation de la capacité de traitement, et non d'un « défaut de compétence », lié à une méconnaissance de l'orthographe (Bonin, 2003; Schelstraete et Maillart, 2004)? Déterminer la cause fonctionnelle des erreurs d'orthographe s'avère nécessaire pour mettre en place des interventions plus adaptées en milieu scolaire.

³ À titre d'exemples, se référer aux quelques articles parus récemment dans différents médias français et québécois (récupérés le 21 mai 2019) : *La qualité du français en déclin au secondaire* (<https://www.journaldemontreal.com/2018/05/07/la-qualite-du-francais-en-declin-au-secondaire>, 2018); *Le niveau en orthographe des écoliers français plonge* (https://www.lemonde.fr/education/article/2016/11/09/le-niveau-en-orthographe-des-ecoliers-francais-plonge_5028192_1473685.html, 2016); *Éducation : le niveau en orthographe des élèves en fin de primaire baisse* (<https://www.lesechos.fr/2016/11/education-le-niveau-en-orthographe-des-eleves-en-fin-de-primaire-baisse-214935>, 2016).

Afin de soutenir l'acquisition de la graphomotricité et de l'orthographe lexicale, il importe de mieux connaître a) la façon dont le geste graphomoteur se développe au cours du primaire, en évaluant tant la qualité du tracé que les caractéristiques spatio-temporelles des mouvements d'écriture, et b) la façon dont il interagit avec les traitements orthographiques, en fonction des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots.

L'objectif de cette recherche doctorale est de confirmer et de préciser, grâce à une approche *bottom-up* de l'écriture, l'influence des traitements graphomoteurs sur les traitements orthographiques au cours de la production écrite de mots isolés chez des scripteurs francophones du primaire. Trois études ont été conçues pour répondre à cet objectif principal, testant chacune les effets d'une variation du coût cognitif des traitements graphomoteurs sur les performances orthographiques.

La première étude ($N = 118$), menée auprès d'élèves français de troisième année (CE2), s'intéresse à l'effet de l'allographe de production – minuscule vs majuscule – sur le nombre d'erreurs orthographiques produites dans une tâche de dictée de mots isolés variant en fréquence et en consistance. La deuxième étude ($N = 48$) réplique le protocole de la première, tout en évaluant, grâce à l'utilisation d'une tablette graphique pilotée par le dispositif *Eye and Pen*© (Alamargot, Chesnet, Dansac et Ros, 2006; Chesnet et Alamargot, 2005), l'effet de l'allographe de production sur la temporalité de l'écriture. La troisième étude ($N = 69$), réalisée auprès d'élèves québécois de première (CP), troisième (CE2) et cinquième (CM2) années, s'intéresse aux effets de la longueur d'un mot – 4 vs 8 lettres – sur le nombre d'erreurs orthographiques produites et le décours temporel des traitements dans une tâche de rappel immédiat écrit de mots fréquents isolés.

Cette thèse est divisée en six chapitres. Le premier chapitre permet de situer la problématique dans laquelle s'insère cette recherche doctorale. Cette partie présente le contexte socio-éducatif du Québec et de la France, tout en discutant du coût cognitif des traitements graphomoteurs et orthographiques dans l'activité de production écrite et des relations entre ces deux habiletés de bas niveau chez les élèves d'âge primaire. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du cadre de référence. Le développement du geste

graphomoteur (acquisition → procéduralisation → automatisation) y est approfondi, en prenant appui sur les stades du modèle *Adaptive Control of Thought* (ACT : Anderson, 1983) : déclaratif, de compilation et de *tuning*. Le développement de l'orthographe lexicale est aussi examiné, en discutant du modèle à double voie en production écrite de mots (Rapp, Epstein et Tainturier, 2002). Cette partie se termine par un état des lieux sur la gestion en temps réel des traitements graphomoteurs et orthographiques (processus périphériques et centraux) dans un système à capacité limitée. Les troisième, quatrième et cinquième chapitres décrivent successivement les trois études de cette thèse, en présentant les fondements théoriques sur lesquels elles s'appuient, les hypothèses de recherche, la méthodologie, les résultats et leur interprétation, ainsi que les limites et perspectives. Le sixième chapitre expose la discussion générale des résultats. Une réflexion à propos des retombées scientifiques, politiques et éducatives de cette recherche doctorale est proposée en guise de conclusion.

PREMIER CHAPITRE

PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre fait état de la pertinence sociale, éducative et scientifique de cette recherche doctorale, réalisée dans le cadre d'une cotutelle franco-qubécoise. Pour ce faire, nous préciserons l'importance du geste graphomoteur – et son rôle sous-estimé dans le milieu de l'éducation – dans l'apprentissage de la langue écrite. Nous discuterons ensuite du coût cognitif des traitements graphomoteurs, de leur relation avec les traitements orthographiques et de leur nécessaire automatisation au cours du développement. Ce chapitre se terminera par la présentation du problème de recherche et par la formulation de questions préliminaires.

1. IMPORTANCE DE L'ÉCRIT DANS LA SOCIÉTÉ

Les habiletés langagières sont aujourd'hui reconnues en tant que clef de voûte du développement intellectuel, de la réussite scolaire et de l'épanouissement personnel et professionnel (Chartrand et Prince, 2009). Avoir de bonnes capacités en lecture et en écriture est en effet devenu un impératif pour réussir sa scolarité et satisfaire aux exigences du travail et de la vie quotidienne (Blaser, 2007). Toutefois, selon le *Programme pour l'évaluation internationale des compétences des adultes*, plus de 50 % de la population québécoise âgée de 16 à 65 ans n'atteint pas le seuil de compétence jugé nécessaire pour fonctionner aisément dans une société fondée sur le savoir, et pour s'adapter aux nombreux changements qui la caractérisent, notamment à l'ère technologique (Gouvernement du Québec, 2015). En France, le constat est encore plus alarmant : ce sont près de 60 % des individus qui ont des lacunes sur le plan de la littératie, étant incapables de bien comprendre, d'évaluer, d'utiliser ou de s'approprier l'information contenue dans des textes écrits (Organisation de coopération et de développement économiques, 2013). Plus de la moitié des adultes sont donc considérés, encore de nos jours, comme des analphabètes fonctionnels, cherchant à éviter les contextes où ils ont à lire et à écrire. Or, si cette situation pouvait convenir à une époque où l'industrie proposait la plupart des emplois, il n'en va pas de même dans notre société moderne, alors que le secteur tertiaire a pris du galon.

Heureusement, le bilan est plus reluisant du côté des jeunes : selon une récente enquête du *Programme international pour le suivi des acquis des élèves*, les Québécois âgés de 15 ans se classent au 2^e rang sur 72 pays en compréhension de l'écrit, alors que les Français se situent au 19^e rang (Gouvernement du Canada, 2016). Cette étude, aussi rassurante qu'elle soit, ne peut toutefois garantir la progression des élèves une fois devenus adultes – leur cheminement en lecture et en écriture se poursuivant si, et seulement si, leur taux de décrochage continue à diminuer et leur taux de diplomation après l'école secondaire continue à augmenter (Gouvernement du Québec, 2015). Cette enquête met par ailleurs en relief les inégalités engendrées par les systèmes éducatifs québécois et français, et en particulier l'écart de performance entre les élèves issus de milieux favorisés et défavorisés. En effet, même si l'école est en mesure de former une élite, elle demeure incapable, en dépit des nombreuses réformes scolaires dont elle a fait l'objet, de résorber son noyau dur d'élèves en difficulté, voire en échec.

Ces résultats montrent bien l'importance de maintenir les actions déjà entreprises visant la promotion des programmes d'éveil à la lecture et à l'écriture, la prévention du décrochage scolaire et, dans une moindre mesure, la bonification des offres de formation continue, afin d'éviter la déperdition progressive des compétences langagières après la sortie de l'école.

2. ORIENTATIONS MINISTÉRIELLES AU QUÉBEC ET EN FRANCE AU REGARD DE LA PRODUCTION ÉCRITE

La maîtrise de la langue écrite chez la population est un sujet de préoccupation quotidien à l'échelle mondiale, alimenté par les résultats d'examens ministériels ou nationaux ainsi que par des enquêtes internationales publiées régulièrement. La qualité du français écrit demeure un enjeu de première importance, dont la responsabilité incombe à la fois à la famille, aux médias, aux entreprises, aux gouvernements, et bien sûr aux enseignants (*Ibid.*, 1987). En effet, la langue écrite permet aux élèves, tout au long et même au-delà de la scolarité, de s'approprier, de construire, d'organiser, de consolider et de restituer des connaissances, soit, en un mot, d'apprendre. De par son potentiel épistémique, le recours à la langue écrite sert à aiguiser notre pensée et à la concrétiser.

Selon les programmes d'études officiels, communiquer de façon appropriée, notamment par l'écrit, constitue un « socle commun » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 6) ou une compétence transversale qui « ne saurait être atteinte par chacun des élèves que si tous les intervenants s'en préoccupent et y consentent des efforts soutenus » (Gouvernement du Québec, 2001, p. 38).

À l'école primaire, les tâches de lecture et d'écriture sont au cœur de la plupart des activités d'enseignement et d'apprentissage (McMaster et Roberts, 2016). Ainsi, l'écriture est l'une des compétences élémentaires les plus sollicitées en classe, mais aussi, et comme nous le témoignerons tout au long de ce travail, l'une des plus longues et des plus complexes à acquérir (Bonin, 2003). En effet, « aucune détermination biologique ne prédispose les enfants à acquérir l'écrit » (Fayol, 2013, p. 34), contrairement à ce qui vaut pour le langage oral par exemple, dont l'acquisition est en grande partie assimilée au cours d'interactions habituelles. La maîtrise de la langue écrite, tributaire de la maturation et de la pratique, exige donc un entraînement répété, régulier et même ritualisé qui doit déborder les frontières de chacune des disciplines.

Nous verrons dans les prochaines sections que l'apprentissage de la production écrite est l'un des enjeux majeurs de l'école, au Québec comme en France, et nous préciserons la place largement sous-estimée qu'occupe la graphomotricité dans les instructions officielles.

2.1 La production de textes à l'école primaire : enjeux et attentes

La maîtrise de la production écrite est l'une des visées fondamentales de l'école primaire, et en particulier des classes de français. Au Québec⁴, « Écrire des textes variés » est l'une des compétences à travailler selon le *Programme de formation de l'école québécoise* (Gouvernement du Québec, 2001, p. 76), alors qu'en France, « Écrire » fait partie intégrante des objectifs d'apprentissage à chacun des cycles (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 12). Les élèves doivent, tant québécois que français, être en mesure de rédiger des textes

⁴ Au Canada, l'éducation est un domaine de juridiction provinciale, ce qui suppose des orientations ministérielles propres à chaque province. Étant donné la population québécoise visée par notre troisième étude, seules les instructions officielles du Québec sont prises en compte dans la problématique de recherche.

suivis, organisés, cohérents et pertinents par rapport à la visée et au destinataire, en soignant leur présentation et en respectant les contraintes de la syntaxe et de la ponctuation et les régularités orthographiques⁵ étudiées au fil des années.

Pour que les élèves puissent rédiger un texte selon les seuils de performance attendus et recourir à la langue écrite comme moyen d'apprentissage, ils doivent d'abord et avant tout en maîtriser la « mécanique ». Pour être en mesure de jeter leurs idées sur papier, les jeunes scripteurs doivent en effet développer leur vocabulaire et organiser leur pensée, mais aussi – et il s'agit sans doute des premières étapes à franchir – apprendre à tracer les lettres et les enchaîner pour produire des mots (Bonin, 2003).

Ainsi, l'activité rédactionnelle sollicite trois composantes qui lui sont propres : la production de textes en elle-même, la mise en œuvre du système orthographique et le geste graphomoteur. Ici, la difficulté est triple : a) ces processus ne sont pas mobilisés successivement mais simultanément, s'enchevêtrant et coexistant à différents moments de la production, b) ils sont eux-mêmes complexes, leurs composantes sous-jacentes étant autant d'objets d'enseignement-apprentissage, et c) en début de scolarisation, et potentiellement jusqu'à la fin de l'école primaire, aucun de ces processus n'est automatisé (Ministère de l'éducation nationale, 2015).

2.2 La graphomotricité dans les programmes d'études au Québec et en France

Dans le milieu scolaire québécois, l'apprentissage de la graphomotricité est souvent confondu avec celui de la calligraphie. Le terme calligraphie, bien ancré dans le vocabulaire des enseignants, provient des radicaux grecs « kallos » et « grapheîn » qui signifient respectivement beauté et écrire. Il réfère donc, étymologiquement, à l'art de bien former les

⁵ Au Québec, l'orthographe d'usage, la conjugaison et les accords font partie des sous-domaines à travailler de la compétence « Écrire des textes variés » (Gouvernement du Québec, 2009). Les élèves doivent être en mesure, au terme du troisième cycle (cinquième et sixième années; élèves âgés de 11-12 ans à la sortie), d'orthographier correctement les mots usuels et les verbes utilisés dans leurs formes les plus fréquentes. En France, la compétence « Comprendre le fonctionnement de la langue » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 23) concerne spécifiquement l'orthographe lexicale et grammaticale. On s'attend à ce que les élèves de la fin du cours moyen (âgés généralement de 11 ans) puissent mémoriser et se remémorer l'orthographe de mots fréquents et de mots irréguliers dont le sens est connu, et orthographier les formes verbales les plus fréquentes.

caractères de l'écriture manuscrite. Il s'attarde ainsi au résultat de l'activité graphique ou à son esthétisme, et non – comparativement à celui de la graphomotricité – aux processus qui ont mené à sa trace. Selon le *Dictionnaire actuel de l'éducation*, la calligraphie se rapporte à une discipline dont l'objectif est d'apprendre à tracer les lettres ou les chiffres « de manière consciente, lisible, rapide » (Legendre, 2005, p. 427). C'est ce terme qui est privilégié lorsqu'il est question, au sein des instructions officielles au Québec, de l'enseignement et de l'apprentissage du tracé des lettres.

Selon le *Programme de formation de l'école québécoise* (Gouvernement du Québec, 2001), les élèves doivent apprendre au cours des quatre premières années à calligraphier lisiblement, en écriture scripte ou cursive, afin qu'on puisse les lire facilement. La qualité de la présentation des textes, qui renvoie à la mise en page, à la disposition et à la calligraphie, est d'ailleurs, pour chacun des cycles⁶, l'un des critères d'évaluation de la compétence à « Écrire des textes variés » (*Ibid.*, p. 76). La calligraphie ne constitue pas, selon les orientations éducatives, un savoir à proprement parler, mais plutôt une technique qu'il faut développer au cours de la scolarité, au même titre que l'utilisation de manuels de référence et d'outils informatiques. Trois critères guident son apprentissage et son évaluation : a) l'espacement régulier entre les lettres et les mots, b) la lisibilité, et c) l'aisance. La calligraphie est donc essentiellement associée à la qualité du tracé. Aucune indication n'est faite quant à la vitesse, à la fluidité ou à l'automatisation du geste d'écriture. La *Progression des apprentissages*, bien qu'elle se targue de s'appuyer sur des données probantes en éducation, n'y jette aucun éclairage supplémentaire (*Ibid.*, 2009).

En France, les repères et attendus concernant l'apprentissage du tracé des lettres sont plus précis et, comme nous le verrons dans la prochaine section, mieux collés sur les savoirs issus de la recherche. Les termes « geste graphomoteur » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 20) et « geste graphique » (*Ibid.*, p. 113), qui invoquent plus directement les

⁶ L'éducation primaire au Québec est composée de six années réparties sur trois cycles : le premier cycle regroupe la première et deuxième années (6-7 ans); le deuxième cycle comprend la troisième et quatrième années (8-9 ans); le troisième cycle réunit la cinquième et sixième années (10-11 ans).

processus qui se mettent en place lors de la production de chacun des allographes⁷, sont d'ailleurs utilisés à la place de la calligraphie. Ces termes, qui renferment des composantes motrice et orthographique, attirent d'emblée l'attention sur les traitements qui sous-tendent la réalisation de la trace.

Toujours selon le programme d'études français, les élèves doivent être en mesure, au terme du cycle 2⁸, de copier de manière experte. Pour ce faire, ils devront exécuter les gestes de l'écriture avec « une vitesse et une sûreté croissantes » (*Ibid.*, p. 21) en automatisant progressivement le tracé normé des lettres. Les performances des élèves français sont ainsi jugées selon différents critères de lisibilité, de clarté et d'organisation spatiale, comme au Québec, mais également de fluidité, de rapidité et d'efficacité : « L'enjeu est d'abord que les gestes graphiques soient complètement automatisés de manière à libérer l'attention des élèves pour d'autres opérations » (*Ibid.*, p. 113). On souligne par ailleurs l'importance, dans ce programme, de poursuivre l'entraînement à l'écriture au cycle 3, période pendant laquelle la « vigilance quant à l'activité graphique » (*Ibid.*, p. 22) doit demeurer forte.

2.3 Décalage entre les orientations ministérielles et les savoirs issus de la recherche au sujet de la graphomotricité

Comme le mentionne Leblanc (2010), un écart considérable, qui dépasse la simple terminologie, subsiste pour la compétence à écrire entre les savoirs issus de la recherche et les orientations officielles au sein de plusieurs pays. La graphomotricité, malgré son rôle essentiel dans l'apprentissage de la production écrite, reste en effet un parent pauvre dans la majorité des systèmes scolaires en Occident – les critères d'évaluation de la graphomotricité demeurant insuffisants et insuffisamment détaillés (Asher et Estes, 2016; Graham, Gillepsie

⁷ L'allographe réfère au code spatial ou à la forme particulière des lettres : majuscule, minuscule, scripte, cursive (e.g. B, b, B, b).

⁸ L'éducation primaire en France est composée de cinq années réparties en deux cycles : le cycle 2 (apprentissages fondamentaux) couvre la période du CP au CE2 (6-8 ans), soit l'équivalent des première, deuxième et troisième années au Québec; le cycle 3 (consolidation) comprend le CM1 et le CM2 (9-10 ans), soit l'équivalent des quatrième et cinquième années au Québec.

et McKeown, 2013; Labrecque, Morin et Montésinos-Gelet, 2013; Leblanc, 2010; Medwell et Wray, 2007, 2008; Vander Hart, Fitzpatrick et Cortesa, 2010).

Bien que l'augmentation de la vitesse d'écriture en cours de scolarité soit considérée, plus que la qualité du tracé, comme un indicateur de la mise place progressive des mécanismes d'automatisation (Anderson, 1983), qui permettent un rappel en mémoire rapide de la forme des lettres et une exécution requérant peu de ressources cognitives, seuls la lisibilité et le style semblent être pris en compte dans les orientations ministérielles en vigueur au Québec. Même si on parle « d'aisance » dans le *Programme de formation de l'école québécoise* (Gouvernement du Québec, 2001, p. 95), cette notion n'y fait l'objet d'aucune définition précise⁹. Par ailleurs, la calligraphie n'est plus au programme au-delà de la quatrième année, ce qui pourrait laisser croire à tort aux enseignants que cette habileté est nécessairement acquise vers l'âge de 10 ans. Or, de nombreuses études montrent que la graphomotricité continue de se développer jusqu'à l'adolescence, et même à l'âge adulte (Connelly, Dockrell et Barnett, 2005; Morin et Alamargot, 2015; Palmis, Danna, Velay et Longcamp, 2017; Pontart et al., 2013; Rueckriegel et al., 2008).

En France, les critères de rapidité et de fluidité sont bel et bien présents dans les instructions officielles, mais ils le sont uniquement dans le cadre d'une évaluation à la fin du cycle 2, dans laquelle on demande aux élèves âgés de 8-9 ans de copier un texte d'une dizaine de lignes dans un laps de temps compris entre 10 et 15 minutes – l'objectif étant ici de développer des « modalités efficaces de copie » ou encore des « stratégies de copie performantes » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 22). C'est donc une fréquence d'inscription, correspondant au nombre de mots produits par minute, qui est évaluée plus que la vitesse de déplacement du crayon, une variable, considérée hors pause, qui témoigne davantage de l'efficacité graphomotrice (Alamargot, Morin, Pontart, Maffre, Flouret et Simard-Dupuis, 2014). Le geste graphomoteur est alors ciblé ou valorisé dans un contexte de

⁹ Le Gouvernement du Québec (2013, 2018) a publié récemment deux bulletins spéciaux au sujet de la graphomotricité (qui proposent des pistes de réflexion et d'action pour le milieu scolaire tout en nuancant les instructions ministérielles), mais les orientations officielles du *Programme de formation de l'école québécoise* (*Ibid.*, 2001) n'ont pas encore été modifiées.

copie particulier, mais ne semble pas être une préoccupation dans les diverses tâches de production d'écrits. On sait pourtant que la vitesse d'écriture peut varier en fonction du type d'exercice proposé ou même des consignes. Comme au Québec, seuls la qualité et plus largement le respect des normes d'écriture font partie des critères d'évaluation dans la démarche de production de textes. On s'attend tout simplement à ce que l'écriture soit lisible, quel que soit le cycle d'apprentissage, et ne subisse pas de déformations au cours des pratiques. Plus spécifiquement, le programme français mentionne que les gestes graphiques doivent être exécutés avec une « sûreté » grandissante (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 21), mais encore une fois, une confusion persiste. Qu'entend-on par sûreté? Quels critères permettent d'en vérifier l'atteinte?

La graphomotricité n'est pas envisagée, ni en théorie ni en pratique, comme une fin en soi, mais comme une étape dont la raison d'être est le réinvestissement dans des situations de production écrite. Même si de nombreuses recherches menées dans le champ de la psychologie cognitive, de la neuroscience ou de l'ergothérapie suggèrent que cette composante est déterminante dans le processus de rédaction, pouvant détourner, lorsqu'elle n'est pas maîtrisée, l'attention des élèves de l'orthographe ou de la syntaxe, son rôle est souvent négligé dans le curriculum (Medwell et Wray, 2007). Aucun programme d'études au Canada ne souligne, en ce sens, la contribution des habiletés graphomotrices dans le déroulement efficient de la production de textes ni dans celui de l'orthographe (Leblanc, 2010). En France, le programme mentionne bien la nécessité de développer des connaissances procédurales et d'automatiser certains savoir-faire, dont le geste graphomoteur, afin de « libérer des ressources cognitives pour que les élèves puissent accéder à des opérations plus élaborées » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 4), mais il reste muet quant à la nature de ces opérations. Seul le dossier *L'apprentissage de l'écriture au cycle 2*, qui constitue une ressource d'accompagnement supplémentaire pour les enseignants, souligne le rôle de la graphomotricité dans la rédaction : « Pour que l'élève accède au sens, il est indispensable que son esprit ne soit pas focalisé sur le tracé des lettres » (*Ibid.*, 2017, p. 1).

Nous pouvons constater que les données issues de la recherche et leur implication pour l'enseignement demeurent partiellement inexplorées, et donc partiellement inexploitées, en contexte scolaire (Medwell et Wray, 2008; Morin et al., 2017). Les programmes d'études laissent un flou sur la calligraphie ou la graphomotricité, alors qu'elle représente une habileté de base importante dans le développement de la compétence à écrire. Cette lacune dans nos instructions officielles, qui orientent le travail des pédagogues et la formation des maîtres, est susceptible d'influencer l'enseignement et l'apprentissage de la production écrite à l'école. En effet, les programmes sous leur forme actuelle ne permettent pas aux enseignants de guider de manière optimale l'automatisation du geste graphomoteur, qui ne se met en place que très lentement à l'école primaire (Lavoie, Morin et Labrecque, 2015).

Dans cette perspective, différentes enquêtes s'intéressant aux pratiques enseignantes ont montré que les modalités d'encadrement dans le domaine de la graphomotricité variaient d'un enseignant à l'autre et semblaient se fonder plus fortement sur des habitudes ou des intuitions que sur les données probantes en éducation – une situation qui n'est pas étonnante devant le manque de clarté des directives ministérielles (Asher, 2006; Bara, Morin, Montésinos-Gelet et Lavoie, 2011; Bonneton-Botté et al., 2019; Graham, Harris, Mason, Fink-Chorzempa, Moran et Saddler, 2008; Labrecque et al., 2013; Lavoie et al., 2015; Vander Hart et al., 2010). Comme le mentionnent Lavoie et al. (2015), les activités en classe se concentrent pour la plupart sur l'esthétisme des lettres au détriment de la vitesse et de la fluidité, deux aspects pourtant incontournables du développement des habiletés graphomotrices et plus encore de la production écrite. Les études montrent également que l'enseignement explicite de la graphomotricité se restreint souvent aux deux premières années de formation, étant délaissé au fur et à mesure que les années avancent, alors que la période sur laquelle s'échelonne son enseignement devrait se poursuivre tout au long du primaire, parallèlement au développement des compétences en orthographe et en production de textes (Chartrel et Vinter, 2004, 2006).

3. COÛT COGNITIF DE LA GRAPHOMOTRICITÉ ET DE L'ORTHOGRAPHE DANS L'ACTIVITÉ DE PRODUCTION ÉCRITE

Les traitements orthographiques et graphomoteurs ont un coût cognitif non négligeable, tant chez l'enfant que chez l'adulte, en production écrite. Chez les apprentis-scripteurs, le geste graphomoteur peut accaparer à lui seul, en exigeant un contrôle conscient, jusqu'aux deux tiers des ressources cognitives disponibles dans le réservoir attentionnel (Foulin et Fayol, 1988). Comme l'exécution graphomotrice, le calcul et/ou la récupération des formes orthographiques monopolisent l'attention des élèves, ces derniers peuvent avoir de la difficulté à considérer et à traiter de manière simultanée les autres dimensions impliquées dans l'activité de production écrite. En raison de la limitation des ressources cognitives en mémoire de travail, une augmentation du coût cognitif des traitements graphomoteurs et/ou des traitements orthographiques est susceptible d'entraîner une perte des informations en mémoire en cours d'écriture. Cet effet perturbateur (i.e. les traitements mobilisent des ressources cognitives au détriment du stockage) pourrait provoquer une augmentation du nombre d'erreurs d'orthographe à l'échelle du mot ou encore un manque de cohérence à l'échelle du texte.

3.1 Coût cognitif des traitements orthographiques en production écrite

Les traitements orthographiques nécessitent un lent processus d'appropriation des conventions de la langue écrite (Morin, Alamargot, Diallo et Fayol, 2018). Selon la théorie capacitaire, que nous décrirons davantage dans le cadre de référence, les processus orthographiques contribuent aux coûts en ressource de la rédaction tant et aussi longtemps que les scripteurs sont « engagés dans une construction en temps réel de l'orthographe plutôt que dans une récupération automatique des formes orthographiques » (McCutchen, 1998, p. 198). Pour l'illustrer, une étude réalisée auprès d'élèves d'âge primaire et secondaire a montré l'existence d'un lien entre les exigences en ressources cognitives et les performances en orthographe et en rédaction (Alamargot, Flouret, Pontart, Morisset, Larocque et Caporossi, 2012). Les résultats de cette recherche indiquent que les scripteurs passent, avec l'âge et l'expertise, d'un mode de contrôle externe, exigeant et sensible aux ressources cognitives, à un mode de contrôle interne, automatisé donc peu coûteux, lorsqu'ils appliquent

la procédure d'accord sujet-verbe. À l'aide d'un dispositif permettant d'enregistrer et d'analyser en temps réel la dynamique de l'écriture et les mouvements oculaires, ces chercheurs ont montré que les fixations régressives sur le nom pendant la production de la flexion étaient fortement réduites chez les élèves de 17 ans, alors qu'elles demeuraient nombreuses chez les élèves de 8 et 11 ans. Les élèves plus âgés, pour lesquels la règle d'accord serait automatisée, pourraient ainsi maintenir en mémoire le nombre du sujet (singulier ou pluriel) plus longtemps. Une autre étude réalisée auprès d'adultes a montré que des erreurs d'accord sujet-verbe pouvaient être provoquées en augmentant le coût cognitif en mémoire de travail, par le biais d'une tâche secondaire, bien que les règles de conjugaison soient maîtrisées relativement tôt dans le cursus scolaire (Fayol, Largy et Lemaire, 1994). Ainsi, même les scripteurs qui ont automatisé le geste d'écriture et qui maîtrisent en principe les règles relatives à l'orthographe grammaticale, à la morphologie ou à la syntaxe peuvent produire, quand le coût cognitif des traitements excède les ressources limitées de la mémoire de travail, un texte dont les propos sont moins étoffés qu'à l'accoutumée ou entaché de fautes (Bourdin et al., 2010).

3.2 Coût cognitif des traitements graphomoteurs en production écrite

Le coût cognitif des traitements graphomoteurs peut contribuer à expliquer pourquoi les textes que les enfants produisent sont meilleurs, en début de scolarité, lorsqu'ils sont dictés à un adulte que lorsqu'ils sont produits à l'écrit de manière autonome (*Ibid.*). En ce sens, Bourdin et Fayol (1994, 2002) ont montré, via une série d'études expérimentales, que la modalité de production avait une influence déterminante sur les performances des enfants dans une tâche de rappel sériel de mots. Les résultats obtenus par ces chercheurs montrent que des élèves âgés de 8 et 10 ans peuvent rappeler plus de mots à l'oral qu'à l'écrit, contrairement à des adultes pour lesquels les performances sont équivalentes dans les deux modalités de production. Ainsi, plus de ressources cognitives sont allouées aux processus graphomoteurs chez les novices, en raison de leur manque de familiarité avec le langage écrit, ce qui leur laisse moins de ressources disponibles pour le maintien des mots en mémoire¹⁰.

¹⁰ La production de mots implique autant les traitements graphomoteurs que les traitements orthographiques, les deux processus pouvant expliquer, pour les enfants, la supériorité de l'oral par rapport à l'écrit.

Ces chercheurs ont aussi montré que des adultes obtenaient des performances comparables à celles des enfants lorsqu'ils devaient écrire en lettres cursives majuscules, connues mais peu utilisées. Une étude menée plus récemment par Grabowski (2010) a répliqué ces résultats tant pour l'écriture manuscrite que pour l'écriture dactylographique. Ce chercheur a montré qu'il était possible, en contraignant intentionnellement le geste des adultes – en interchangeant par exemple des touches sur un clavier d'ordinateur – d'altérer leurs performances.

Pour tester plus encore l'implication des processus graphomoteurs dans l'activité de production écrite, Olive et Kellogg (2002) ont demandé à des élèves de 9 ans et à des adultes de copier ou de rédiger un texte, simultanément à une tâche secondaire qui exigeait de répondre le plus rapidement possible à des signaux sonores chaque fois qu'ils étaient émis. Chez les enfants, les résultats indiquent, aussi bien en copie qu'en rédaction, une augmentation des temps de réaction associés à l'exécution graphomotrice. Chez les adultes toutefois, les temps de réaction sont inférieurs en copie, ce qui suggère qu'ils ont automatisé la graphomotricité et qu'ils peuvent réaliser, parallèlement à l'écriture, d'autres processus : « In children, such concurrent activation was not observed, because the demands of motor transcription alone consumed too much attention. Put simply, only the adult writers were able to think and write at the same time¹¹ » (*Ibid.*, p. 598). Or, lorsque ces adultes avaient pour consigne d'écrire en lettres majuscules, comme dans les expériences décrites précédemment, les temps de réaction étaient plus importants et les productions de moins bonne qualité « When the demands of transcription were heavy, adults began to neglect high-level processes and to focus on motor execution¹² » (*Ibid.*).

Le coût cognitif des traitements graphomoteurs peut également compromettre la dynamique, notamment temporelle, des différents processus engagés au cours de la production écrite. Dans cette perspective, l'utilisation de lettres majuscules chez des adultes,

¹¹ Chez les enfants, une telle activation simultanée n'a pas été observée, car l'exécution graphomotrice consommait trop de ressources cognitives. En termes simples, seuls les adultes étaient capables de penser et d'écrire en même temps [traduction libre].

¹² Les processus de haut niveau ont été négligés chez les adultes lorsque les contraintes graphomotrices étaient plus lourdes [traduction libre].

qui pourrait « consommer toutes les ressources disponibles » (Olive, Alves et Castro, 2007, p. 71) en mémoire de travail, engendre des effets négatifs sur la rédaction de textes. En plus de limiter le nombre de mots qu'ils produisent par minute, la longueur des phrases et la qualité globale de leurs textes, l'augmentation des ressources cognitives associées à l'allographe majuscule, mesurée par une tâche de temps de réaction, les oblige à modifier leur stratégie d'écriture : les scripteurs adoptent un mode de traitement séquentiel du flux de l'information plutôt qu'une coordination simultanée des processus graphomoteurs, orthographiques et rédactionnels (*Ibid.*, 2009). Ces processus s'engagent ainsi dans le temps de façon successive, un traitement attendant le produit de l'autre pour s'enclencher; ce n'est que lorsque la vitesse de production devient suffisamment grande, et si la capacité cognitive le permet, que les processus de haut niveau peuvent s'engager parallèlement aux processus de bas niveau.

4. RELATIONS ENTRE LES HABILETÉS GRAPHOMOTRICES ET ORTHOGRAPHIQUES

Les études qui se sont intéressées au rôle des habiletés graphomotrices dans la compétence à écrire des élèves se sont concentrées, pour la plupart, sur le lien entre la graphomotricité et la production de textes (cf. Kent et Wanzek, 2016). Ces études corrélationnelles et d'entraînement montrent que la récupération des lettres en mémoire et leur production peuvent affecter, jusqu'à ce que la composante graphomotrice devienne au moins partiellement automatisée, la disponibilité des ressources cognitives et, par conséquent, la quantité de ressources pouvant être allouées aux processus de planification, de mise en texte ou de révision (cf. Olive, 2014).

D'autres études, moins nombreuses, ont aussi mis en lumière une corrélation positive entre les habiletés graphomotrices et les performances en orthographe lexicale (Cf. Annexe A). La relation entre la graphomotricité et l'orthographe a été observée du préscolaire à l'école secondaire (Abbott et al., 2010; Pontart et al., 2013). Même si les coefficients de corrélation varient passablement d'une étude à l'autre, la taille de l'effet demeure, pour la plupart, de moyenne amplitude. La force de la relation semble aussi diminuer, comme le soulignent Kent et Wanzek (2016), en fonction du niveau scolaire.

Les habiletés graphomotrices ont été évaluées dans ces études à partir de tâches, imposant ou non une contrainte temporelle, de dictée de lettres, de rappel écrit du nom-prénom, de rappel écrit de la chaîne alphabétique ou de copie (e.g. pangramme, phrase, court paragraphe, texte), selon différents critères de vitesse, de conformité et de fluidité¹³. Plusieurs tâches ont également été utilisées, au sein de ces études, pour évaluer les compétences en orthographe des élèves, que ce soit par le biais de dictées de mots et de pseudo-mots, d'épreuves nationales, de tests standardisés et de tâches de rédaction de textes, variant selon le genre. L'éventail d'approches, de dispositifs, de procédures et d'outils d'évaluation, qui peuvent avoir peu en commun, rend la comparaison des résultats d'une étude à l'autre difficile. Pour l'illustrer, prenons l'exemple de la tâche de l'alphabet, qui est régulièrement utilisée en psychologie cognitive pour évaluer les habiletés graphomotrices des élèves (cf. Annexe A). Selon Rosenblum (2005), cette tâche serait suffisamment sensible pour distinguer les mauvais et les bons scripteurs. Or, cette tâche ne sollicite pas uniquement des traitements graphomoteurs, mais mobilise également des connaissances alphabétiques et orthographiques relatives aux sons et aux noms des lettres (Alamargot et al., 2014; Barrientos, 2016; Peake, Diaz et Artiles, 2017; Pontart et al., 2013; Rodriguez et Villarroel, 2016). En outre, cette tâche implique des capacités mémorielles – en raison du rappel ordonné des lettres, une activité peu fréquemment pratiquée en contexte de classe – et des fonctions exécutives. En effet, l'écriture de lettres sérielles et isolées est sans doute contraignante sur le plan cognitif pour les élèves, à plus forte raison quand ils sont entraînés à l'écriture cursive depuis leur entrée à l'école. Le fait de laisser systématiquement des espaces entre chacune des lettres fragmente par essence la programmation et l'exécution graphomotrices et nécessite probablement une inhibition de l'habitude ou du désir de joindre les lettres entre elles. La tâche du nom-prénom apparaît, pour ces raisons, plus écologique que celle de l'alphabet pour évaluer les habiletés graphomotrices : a) elle implique la chaîne de lettres la plus connue et sans doute la plus automatisée, b) elle s'appuie sur des correspondances

¹³ Ce concept, équivalent au terme anglophone *accuracy*, unit la vitesse et la conformité (i.e. lisibilité). Ce score, utilisé le plus souvent pour la tâche de l'alphabet, correspond au nombre de lettres conformes produites dans l'ordre dans un intervalle de temps donné.

phonème-graphème mémorisées à un âge précoce et pouvant être récupérées directement, et c) elle évite de segmenter les unités graphomotrices (Pontart et al., 2013).

Parmi les études corrélationnelles que nous avons recensées, seule celle de Pontart et al. (*Ibid.*) a, à notre connaissance, évalué les relations entre la graphomotricité et l'orthographe d'un point de vue dynamique. Ces chercheurs ont montré que les habiletés graphomotrices, évaluées via le rappel écrit de l'alphabet et celui du nom-prénom, influençaient, en plus de la réussite, le décours temporel des traitements orthographiques. Pour les élèves du primaire (7-11 ans), la vitesse de déplacement du crayon, un indicateur du degré d'automatisation graphomotrice, était corrélée négativement, quelle que soit la tâche, avec le pourcentage de mots mal orthographiés; la durée de production, incluant des périodes de pauses et d'écriture, était pour sa part corrélée positivement avec le pourcentage de mots mal orthographiés. Autrement dit, les élèves du primaire qui écrivaient le plus rapidement les lettres de l'alphabet et celles de leur nom et prénom, en pausant le moins fréquemment, performaient davantage à la dictée de mots.

Ces résultats confirment, à l'instar de ceux de Fayol et Miret (2005), que la graphomotricité consomme d'importantes ressources cognitives chez les plus jeunes élèves, gênant indirectement les traitements orthographiques :

In the primary grades, the lack of graphomotor automatization, combined with less efficient alphabet letter retrieval, seemed to place a heavy burden on attentional resources, (i) triggering errors by making it difficult to maintain the orthographic form during its execution, and (ii) increasing handwriting duration by forcing participants to halt or slow down their handwriting, in order to reiterate the central processing of spelling each time there was a storage failure¹⁴. (Pontart et al., 2013, p. 6)

¹⁴ La non-automatisation du geste graphomoteur, associée à une récupération moins efficace des lettres de l'alphabet, pèse sur les ressources cognitives de la mémoire de travail chez les élèves du primaire en i) provoquant des erreurs, en raison d'une difficulté de maintien de la forme orthographique d'un mot pendant son exécution, et ii) augmentant la durée de production, en les obligeant à arrêter ou à ralentir leur geste d'écriture afin de réitérer le traitement central de l'orthographe chaque fois qu'il y a une défaillance de stockage [traduction libre].

Pour les élèves du secondaire (12-15 ans), le pourcentage de mots mal orthographiés était corrélé positivement avec la durée de production, mais seulement pour le rappel écrit de l'alphabet – en raison sans doute des connaissances alphabétiques et orthographiques que cette tâche sollicite. Ces résultats, et l'absence de corrélation significative entre la vitesse de déplacement du crayon et les performances orthographiques, suggèrent, comme le proposent aussi Chartrel et Vinter (2004, 2006), que l'exécution graphomotrice des adolescents est automatisée; il semble, conformément au modèle en cascade de Van Galen (1991) que nous décrirons dans le prochain chapitre, que les scripteurs puissent gérer à ce moment les traitements graphomoteurs et orthographiques en parallèle.

5. ÉTAT DE L'ART SUR L'IMPORTANCE DE LA GRAPHOMOTRICITÉ DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION ÉCRITE

Être en mesure de rédiger un texte à la main, qui représente l'une des compétences visées par les programmes d'études officiels au Québec (Gouvernement du Québec, 2001) comme en France (Ministère de l'éducation nationale, 2015), est une tâche complexe. Sa réussite est soumise, comme nous l'avons vu, à une maîtrise minimale de deux processus de bas niveau : la graphomotricité et de l'orthographe (Pérez et Giraudo, 2016). Au cours du primaire, les élèves doivent apprendre à tracer conformément chacune des lettres avec fluidité – ce qui leur permettra d'acquérir une vitesse d'exécution ultérieurement exigible – et de les enchaîner pour former des mots, en respectant les contraintes orthographiques. Ces deux opérations se font dans un système à capacité limitée (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996, 1998) et consomment d'importantes ressources cognitives en début d'apprentissage.

Chez les novices, le coût cognitif des traitements graphomoteurs peut excéder à lui seul les ressources cognitives disponibles en mémoire de travail. Chez les experts, la composante graphomotrice est automatisée, ce qui leur permet de déplacer leur attention vers des activités de plus haut niveau. Il suffit toutefois que des contraintes soient exercées sur l'activation de production écrite ou que la « routine » soit modifiée – en obligeant par exemple les participants à écrire en lettres majuscules ou en intégrant une tâche secondaire (Bourdin et Fayol, 1994, 2002; Fayol et al., 1994; Grabowski, 2010; Olive et al., 2007, 2009;

Olive et Kellogg, 2002) – pour que la mise en œuvre des processus centraux et périphériques soit compromise.

Ces dernières années, plusieurs recherches menées dans le champ de la psychologie cognitive ont confirmé la relation entre les habiletés graphomotrices et les compétences rédactionnelles (cf. Kent et Wanzek, 2016). Comme l'exprime Bonin (2003), ces travaux se sont centrés sur le texte, et non sur la production de mots isolés – constat qui étonne, car toute production de textes ou de phrases nécessite la récupération de mots en mémoire et leur actualisation sous forme graphique.

À l'échelle du mot, des études corrélationnelles ont mis en évidence un lien entre les habiletés graphomotrices des élèves et leurs performances en orthographe lexicale – au sein de tâches de dictées de mots et de pseudo-mots, d'épreuves nationales ou de tests standardisés, qui n'imposent cependant pas les mêmes contraintes cognitives et langagières. Ces différents travaux conduits pour la plupart en anglais (cf. Annexe A) ont analysé les performances des élèves d'un point de vue statique, à l'aide de méthodes *offline*, en considérant comme mesure graphomotrice la qualité du tracé – conformité ou fluidité – et comme mesure orthographique le pourcentage de mots erronés ou réussis. Aucune, hormis celles de Pontart et al. (2013) auprès de Français et de Wicki, Hurschler Lichtsteiner, Geiger et Müller (2014) auprès de Suisses de langue maternelle allemande, n'a eu recours à une méthode *online* ou à un pistage en temps réel, en considérant la production écrite d'un mot et les traitements qu'elle sous-tend d'un point de vue dynamique.

6. PROBLÈME DE RECHERCHE ET QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

Au regard de ce qui précède, il est pertinent d'approfondir le lien entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques chez les élèves francophones du primaire. Plus spécifiquement, il nous apparaît nécessaire d'analyser plus avant a) le développement de la graphomotricité, et b) l'influence qu'elle exerce en temps réel sur les traitements orthographiques au cours de l'acquisition du langage écrit. Dans cette perspective, cette recherche doctorale se propose de répondre aux questions suivantes :

Dans quelle mesure les traitements graphomoteurs influencent-ils la réussite et le déroulement temporel des traitements orthographiques au cours de la production écrite de mots isolés? Comment cette influence se modifie-t-elle avec le développement des habiletés graphomotrices? Sous quelles conditions les erreurs de performance, qui traduisent un dysfonctionnement ponctuel du système de production, se manifestent-elles?

DEUXIÈME CHAPITRE

CADRE DE RÉFÉRENCE

Le deuxième chapitre de cette thèse est consacré à la présentation du cadre de référence. Nous examinerons d'abord le développement du geste graphomoteur et nous proposerons, à la lumière du modèle *Adaptive Control of Thought*¹⁵ (ACT : Anderson, 1983), une évolution des habiletés graphomotrices en trois « phases temporelles » : la phase déclarative, la phase de compilation et la phase de *tuning*. Nous survolerons ensuite le développement de l'orthographe lexicale, avant d'aborder la question du décours temporel des traitements graphomoteurs et des traitements orthographiques au cours de la production écrite d'un mot. Ce chapitre se terminera par la présentation des objectifs généraux.

1. DÉVELOPPEMENT DE LA GRAPHOMOTRICITÉ

Cette section concerne le développement de la graphomotricité ou, pour reprendre l'expression de Berninger (2000), « the language system by hand¹⁶ » (p. 66), et de ses habiletés sous-jacentes. Comme nous l'aborderons dans ce chapitre, la production écrite est une activité complexe qui requiert la maîtrise d'habiletés perceptives, motrices, cognitives et linguistiques (Bara et Gentaz, 2010; Rosenblum, Weiss et Parush, 2003). Il s'agit d'une tâche exigeante, puisqu'elle implique, grâce aux articulations de l'épaule, du coude, du poignet, de la main et des doigts (Chartrel et Vinter, 2004), la « production rapide de formes graphiques de petite taille et de forte similarité spatiale » (Zesiger, 2003, p. 57).

1.1 Modélisation de la production écrite des experts d'après Van Galen (1991)

Le modèle d'experts de Van Galen (1991), schématisé à la figure 1, est l'un des premiers à intégrer l'ensemble des processus conduisant au geste graphomoteur, de la génération d'idées à la trace écrite. Il concerne donc la production écrite dans sa globalité et

¹⁵ Ce modèle d'apprentissage par l'action permet de formaliser le développement de la graphomotricité, qui ne bénéficie pour l'instant d'aucun modèle intégrateur satisfaisant. Il permet d'illustrer le lien entre l'automatisation des connaissances et la libération des ressources cognitives en mémoire de travail.

¹⁶ Langage par la main [traduction libre].

postule l'existence de divers niveaux de traitements pour transformer une séquence de mots et de lettres en mouvements, des processus centraux à leur implémentation dans le système moteur.

Modules de traitement	Taille des unités	Type de mémoire
Activation d'intentions	Idées	Mémoire épisodique
↓	↓	↓
Rappel sémantique	Concepts	Lexique verbal
↓	↓	↓
Construction syntaxique	Phrases	Mémoire à court terme
↓	↓	↓
Orthographe	Mots	<i>Buffer</i> graphémique
↓	↓	↓
Sélection des allographes	Graphèmes	Mémoire motrice
↓	↓	↓
Contrôle de la taille	Allographes	Tampon moteur
↓	↓	
Ajustement musculaire	Traits	

Figure 1 : Le modèle de Van Galen (1991)

Selon ce modèle, la production écrite chez l'expert est une activité multitâches qui s'appuie sur des processus cognitifs, psychomoteurs et biophysiques. Ce modèle comprend des modules linguistiques (rappel sémantique, construction syntaxique et orthographe) et des modules moteurs (sélection des allographes, contrôle de la taille et ajustement musculaire), opérant en parallèle ou en cascade malgré l'aspect sériel de leur présentation. Ces modules obéissent à une structure hiérarchique, la production écrite étant la résultante de traitements et d'unités, impliqués simultanément dans l'activité, allant du plus abstrait (idées) au plus concret (traits). Ainsi, plus les composantes de ce modèle sont situées à un niveau élevé dans la hiérarchie, plus elles sont en avance dans le temps par rapport à la production écrite (Zesiger, 1995). Les mouvements destinés à produire les dernières lettres d'un mot peuvent par exemple être programmés, chez l'expert, pendant l'exécution des premières lettres; il s'agit donc d'une structure descendante (i.e. *top-down*), efférente, du cortex vers la périphérie. Comme l'atteste ce modèle, et nous y reviendrons plus en profondeur en fin de chapitre, les traitements linguistiques, dits de haut niveau, peuvent affecter, en fonction des caractéristiques et des contraintes de la tâche, les paramètres spatiaux, temporels, cinématiques et/ou dynamiques de l'écriture.

1.1.1 Représentations orthographiques et buffer graphémique

Selon Van Galen (1991), les représentations orthographiques sont maintenues temporairement actives dans le *buffer* graphémique en vue de leur production écrite, le temps nécessaire pour récupérer en mémoire à long terme les programmes moteurs et exécuter la réponse motrice appropriée chez les experts (Tainturier et Rapp, 2001). Ce stock à caractère transitoire constitue le point d'arrivée des processus centraux (i.e. langagiers : phonologiques, sémantiques et orthographiques) et le point de départ des processus périphériques (i.e. allographiques, de préparation et d'exécution des programmes moteurs). Cette mémoire tampon ne stocke qu'une quantité d'informations limitée pour une durée limitée. Elle est donc particulièrement influencée par la longueur des mots à produire (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza, Miceli, Villa et Romani, 1987; Costa, Fischer-Baum, Capasso, Miceli et Rapp, 2011; Goodman et Caramazza, 1986; Planton, Jucla, Démonet et Soum-Favaro, 2017).

Les représentations orthographiques sont conçues, dans le modèle de Van Galen (1991), comme de simples chaînes linéaires de lettres. Ainsi, la durée de production de la lettre « a » dans les mots « clavier » et « prairie » devrait toujours être identique, bien que ces deux mots possèdent une structure graphémique qui leur est propre (Kandel et Spinelli, 2010). Dans ce modèle, les unités traitées passent directement des mots aux graphèmes; il nie donc l'existence d'éventuelles unités sous-lexicales supérieures aux graphèmes (e.g. bigrammes, trigrammes, morphèmes et syllabes) susceptibles d'affecter l'organisation du geste graphomoteur. Cette position a toutefois été remise en question sur la base de nombreux résultats de recherche, en français comme en d'autres langues (cf. Hess, Mousikou, Verrel et Schroeder, 2018; Humblot, Fayol et Lonchamp, 1994; Kandel, Peereman, Ghimenton et Perret, 2019; Lambert, Sausset et Rigalleau, 2015; Sausset, Lambert et Olive, 2013; Sausset, Lambert, Olive et Larocque, 2012).

1.1.2 Traitements constitutifs de la programmation graphomotrice

D'après Van Galen (1991), la programmation graphomotrice implique, chez l'expert, trois étapes distinctes : a) le rappel du programme moteur stocké en mémoire à long terme,

définissant la forme de la lettre (allographe) et l'ordre dans lequel les traits doivent être effectués, b) la paramétrisation de la force, déterminant la taille relative de ces traits, leur direction et leur vitesse d'exécution, selon l'amplitude du mouvement, et c) la sélection des groupes musculaires à activer, recrutant un nombre approprié d'unités motrices, en fonction du contexte biophysique.

Les informations contenues dans le *buffer* graphémique ne concernent, selon ce modèle, que l'identité et l'ordre des graphèmes formant les mots. Elles sont principalement de nature spatiale. La structure du mouvement en aval présente en effet un certain nombre de régularités chez les adultes, indépendamment des contextes de production (Zesiger, 1992).

Les programmes moteurs correspondent, comme en font foi les principes d'invariance énumérés dans les prochaines lignes, à une représentation abstraite et amodale, élaborée au niveau central, d'une séquence de mouvements permettant de tracer la forme caractéristique de chaque lettre (Chartrel et Vinter, 2004; Palmis et al., 2017; Thibon, Gerber et Kandel, 2018a; Vinter et Zesiger, 2007). Ces principes sont les suivants : a) *équivalence* : les mêmes lettres peuvent être produites par des effecteurs différents (e.g. main ou pied), sur des supports différents (e.g. papier ou tableau vert), tout en conservant leurs caractéristiques individuelles (Ellis, 1982), b) *homothétie spatiale* : les rapports de longueur entre les segments d'une lettre et la longueur totale de la lettre sont sensiblement les mêmes d'un contexte à l'autre, en dépit de modifications importantes dans la taille des productions, c) *homothétie temporelle* : les rapports de durée d'exécution entre les traits d'une lettre et sa durée de production totale demeurent invariables, malgré des modifications importantes dans la vitesse des productions, et d) *isochronie* : la vitesse d'exécution d'une lettre est proportionnelle à la longueur de sa trajectoire. Si ces principes connaissent, dans un cadre écologique, de sérieuses limites d'application, ils confirment néanmoins la nature des programmes moteurs. Ces quatre principes montrent, comme l'expriment Chartrel et Vinter (2004), que « la maîtrise des paramètres absolus des lettres, comme leur taille par exemple, n'est certainement pas essentielle à la mise en place des premiers automatismes » (p. 175). L'exécution graphomotrice apparaît donc flexible aussi bien chez les enfants que chez les adultes, pouvant s'adapter aux contraintes spatio-temporelles de la tâche (Alamargot et

Morin, 2015; Chartrel et Vinter, 2008; Fitzpatrick, Vander Hart et Cortesa, 2013; Gerth et al., 2016a, 2016b; Guilbert, Alamargot et Morin, 2018a; Pagliarini et al., 2015; Van Galen et Weber, 1998).

L'unité de base dans la programmation graphomotrice peut correspondre à un trait, un couple de traits, une lettre ou une combinaison de lettres (Bara et Gentaz, 2010; Marcelli, Parziale et Senatore, 2013; Portier, Van Galen et Meulenbroek, 1990; Stelmach et Teulings, 1983; Teulings, Thomassen et Van Galen, 1983; Thibon et al., 2018a; Wing, 1978). Elle peut aussi dépendre de la complexité des lettres, de la nature de la tâche, du degré de pratique et de la familiarité des tracés à produire :

The idea that the unit size may vary with practice is not implausible. New graphemes at first will be organised and learned as a combination of strokes, after more practice letters and digits may become the units, and after even more practice a unit may include some very frequent lettercombinations, a signature being perhaps an example of the largest possible lettercombinations¹⁷. (Hulstijn et Van Galen, 1983, p. 43)

Ainsi, la lettre n'est plus gérée, chez les experts, comme la somme de ses traits qu'il faut indépendamment programmer, mais comme une unité globale que l'on ne peut plus segmenter. Selon Lambert et Espéret (2002), plus l'unité est petite, plus le traitement graphomoteur, alors au pas-à-pas, nécessite de ressources cognitives. L'assemblage des unités du trait vers la lettre, avec la maîtrise progressive des différentes unités linguistiques, permet une économie cognitive, en évitant une surcharge d'informations en mémoire, ce qui accélère et allège la production (Thibon et al., 2018a).

Pour résumer, la production écrite, qui est à la fois praxie et langage, repose sur un ensemble de compétences selon le modèle de Van Galen (1991) : les connaissances linguistiques, les connaissances visuo-spatiales, liées aux représentations allographiques ou

¹⁷ L'idée que la taille de l'unité de base du programme moteur varie au cours de l'apprentissage de la production écrite n'est pas invraisemblable. Les lettres seront d'abord organisées et apprises sous la forme d'une combinaison de traits; avec la pratique, les lettres représenteront l'unité de base; après une pratique encore plus intensive, cette unité pourra inclure des combinaisons de lettres très fréquentes, la signature des individus représentant sans doute un exemple de la plus grande combinaison de lettres possible [traduction libre].

à la casse (majuscule ou minuscule) et au style des lettres (script ou cursif), stockées en mémoire à long terme, et les capacités de programmation et d'exécution motrices, la coordination des muscles agonistes et antagonistes permettant de contrôler la séquence, la taille des traits ou des lettres et leur organisation spatiale.

1.2 Évolution des habiletés graphomotrices : qualité et dynamique du tracé

La composante graphomotrice dépend de la maîtrise de trois habiletés non-verbales de bas niveau : a) l'intégration visuo-motrice, qui fait référence à la coordination entre la perception visuelle et les mouvements appropriés des doigts et de la main, b) la motricité fine, qui permet au scripteur de manier le crayon avec précision, afin de produire des traits et des lettres dont la taille, la forme et la position sont adéquates, et c) les habiletés proprioceptives et kinesthésiques, qui informent sur la position et les mouvements du corps et des membres dans l'espace (cf. Alamargot et al., 2014).

1.2.1 Vue d'ensemble du développement de la « motricité graphique » selon De Ajuriaguerra, Auzias et Denner (1971)

Selon De Ajuriaguerra et al. (1971), l'écriture se développe des origines à la maturité en traversant une série de transformations qui témoignent de sa croissance et en marquent les phases. La genèse de l'écriture repose sur le développement psychomoteur, lui-même dépendant de la maturation générale du système nerveux et de l'exercice. Selon ces chercheurs, trois grandes étapes caractérisent l'acquisition de l'écriture sur le plan moteur : a) *pré-calligraphique* (5-9 ans), b) *calligraphique infantile* (9-12 ans), et c) *post-calligraphique* (12-16 ans).

À la phase pré-calligraphique, l'élève est incapable, en dépit de ses efforts, de respecter les normes calligraphiques (e.g. nombre, orientation et taille des traits, espacement inter-mots, alignement sur la page) imposées par l'institution scolaire : les traits sont cassés, les courbes anguleuses, les lettres cabossées, les lignes fluctuantes, le mouvement saccadé, l'attitude peu tonique, la posture crispée. Il s'efforce tant bien que mal à la régularité, mais n'y parvient pas en raison d'une incapacité ou d'une immaturité motrice. À cette étape, les

informations sensorielles jouent un rôle central. Comme nous le détaillerons dans les prochaines sections, chaque trait de lettre contient, sur le plan cinématique, plusieurs couples accélération-décélération et de nombreuses pauses (Wicki et Hurschler Lichtsteiner, 2018; Zesiger, Deonna et Mayor, 2000). Les mouvements de l'élève sont donc lents, hésitants, discontinus et composés de nombreux temps morts, la « mélodie kinétique » n'étant pas encore construite (De Ajuriaguerra et al., 1971, p. 69). Cette étape correspond à une phase d'apprentissage formel de l'écriture, conjuguant celui de la forme des lettres (allographes) et de leur enchaînement. Les progrès, qui réclament un entraînement quotidien, se font par l'intégration d'une succession d'automatismes, permettant graduellement aux élèves de construire, d'emmagasinier et de stabiliser, en mémoire à long terme, une représentation visuelle et motrice des lettres.

Petit à petit, le tracé gagne en régularité et en aisance. À la phase calligraphique infantile, les indices visuels et/ou kinesthésiques, toujours utilisés pour contrôler l'agencement spatial de l'écriture sur la page, ne sont plus nécessaires pour contrôler étroitement le tracé des lettres. Celles-ci peuvent d'ailleurs être produites avec succès les yeux fermés. Le mouvement, entièrement programmé au niveau central, peut dorénavant être exécuté correctement et rapidement sans référence aux indices sensoriels. Les élèves, qui ont souvent plus de difficulté à ce moment à orthographier un mot qu'à l'exécuter sur le plan technique – ce qui peut venir rompre la continuité du mouvement –, sont ainsi en mesure de « gérer l'exécution des traits simultanément à la programmation et à la paramétrisation d'autres traits ou, au minimum, du trait à venir » (Zesiger, 1995, p. 214). À cette étape, l'écriture manuscrite repose sur des règles de production motrice qui en modifient les aspects statiques et dynamiques.

À la phase post-calligraphique, l'élève développe un degré de maîtrise graphique semblable à celui de l'adulte : les mouvements ont leur propre régulation et deviennent de plus en plus automatisés. La vitesse apparaît alors prioritaire, au détriment parfois de la qualité du tracé (Bara et Gentaz, 2010).

Le modèle de De Ajuriaguerra et al. (1971) a permis, dans les années 70, de poser les premiers jalons du développement de la graphomotricité et de ses difficultés. Les avancées des recherches menées au cours des dernières décennies permettent de mieux comprendre aujourd'hui l'évolution de deux facteurs impliqués dans cet apprentissage : a) la qualité du tracé, qui tient compte de la forme des lettres, mais aussi de leur agencement au sein des mots et de leur organisation sur la page, et b) les caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur (Danna, Velay et Albaret, 2016; Jolly et Gentaz, 2013; Ziviani et Wallen, 2006).

1.2.2 Amélioration de la qualité du tracé

Les études empiriques qui se sont intéressées au développement de la graphomotricité ont montré que la qualité du tracé, évaluée à partir de la copie d'un court paragraphe ou d'un texte¹⁸, augmentait de manière significative jusqu'à l'âge de 7 ans (Karlsdottir et Stefansson, 2002), 9 ans (Overvelde et Hulstijn, 2011), 10 ans (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990) ou 11 ans (Graham, Berninger, Weintraub et Schafer, 1998), avant de se stabiliser. Certaines ont également montré qu'elle pouvait faire l'objet d'une dégradation à partir de 11 ans (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Graham et al., 1998; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990; Weintraub, Drory-Asayag, Dekel, Jokobovits et Parush, 2007), la recherche de vitesse étant alors privilégiée par les élèves au détriment de la précision (cf. Feder et Majnemer, 2007; Vinter et Zesiger, 2007).

¹⁸ Dans les études néerlandaises de Blöte et Hamstra-Bletz (1991), Hamstra-Bletz et Blöte (1999) et Overvelde et Hulstijn (2011), la qualité du tracé a été évaluée à partir d'un score composite établi selon les 13 critères de l'*Échelle d'évaluation rapide de l'écriture* (BHK), soit : taille de l'écriture; inclinaison de la marge; rectitude des lignes; espacement entre les mots; écriture chaotique; liens interrompus entre les lettres; télescopages de lettres; variation de la hauteur des lettres troncs; variation de la hauteur entre les lettres troncs et les lettres à hampes ou jambages; distorsions des lettres; lettres ambiguës; lettres retouchées; hésitations et tremblements. Dans l'étude américaine de Graham et al. (1998), la qualité du tracé a été évaluée en comparant aussi étroitement que possible la production des élèves à des spécimens classés entre 1 et 9 (exemples gradués notés du moins au plus lisible). Dans l'étude néerlandaise de Karlsdottir et Stefansson (2002), les lettres ont été jugées conformes selon leur degré de ressemblance avec un modèle allographique standard.

1.2.3 *Amélioration des caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur*

En comptant le nombre de lettres produites dans un intervalle de temps donné, de nombreux chercheurs ont montré que le profil développemental de la fluence d'écriture était continu et linéaire au cours du primaire (Feder et Majnemer, 2007; Graham et al., 1998; Karlsdottir et Stefansson, 2002; Meulenbroek et Van Galen, 1988; Weintraub et al., 2007).

Or, comme le soulignent avec justesse Bara et Gentaz (2010), évaluer le tracé des lettres à partir du produit fini ou du résultat de l'activité graphique ne fournit pas d'informations précises quant aux processus sous-jacents qui ont donné lieu à cette production. L'utilisation d'indices dynamiques, via le recours à une tablette graphique notamment, permet d'analyser avec une plus grande fiabilité et précision la production et le contrôle des mouvements d'écriture, raffinant notre compréhension du fonctionnement et du développement de la composante graphomotrice (Wicki et Hurschler Lichtsteiner, 2018).

À l'aide d'une analyse en temps réel de l'écriture, Meulenbroek et Van Galen (1986) ont observé, dans une étude menée auprès de 30 élèves néerlandais âgés de 6 à 9 ans, un développement non monotone du geste graphique. Ils ont montré, à partir d'une tâche de copie de patterns répétitifs (e.g. cycloïdes, vagues, zigzags), une période d'instabilité vers 8 ans, les mouvements, bien que rapides, présentant à cet âge une grande variabilité spatiale et de nombreux pics de vitesse. Ces chercheurs ont également observé, dans une tâche de copie de lettres proposée à 75 élèves néerlandais de 7 à 12 ans, une diminution du temps de mouvement ainsi qu'une augmentation de la fluidité et de la vitesse d'écriture en fonction de l'âge (*Ibid.*, 1988). Il faut néanmoins signaler dans cette étude, comme dans la précédente, un déclin temporaire des performances graphomotrices entre 8 et 9 ans. Cette discontinuité dans le développement serait liée à la substitution d'une stratégie de contrôle proactive à une stratégie de contrôle rétroactive, qui s'avère plus efficace à long terme, mais qui entraîne une perturbation passagère.

Plus récemment, Rueckriegel et al. (2008) ont étudié, d'un point de vue dynamique, l'influence de l'âge, du sexe, de la latéralité et du degré d'expérience en motricité fine sur le

développement du dessin (tracé d'un cercle) et de la graphomotricité (copie de la lettre « a » et d'une phrase). À partir d'un échantillon composé de 187 élèves allemands âgés de 6 à 18 ans, ces chercheurs ont montré que seul l'âge, parmi l'ensemble de ces variables, avait un impact significatif sur les performances. La vitesse du tracé, la fluidité et la pression exercée par le stylo sur la surface de la tablette corrélaient toutes avec l'âge, quelle que soit la tâche. Ces résultats reflètent bien, comme le soutenaient aussi De Ajuriaguerra et al. (1971), l'influence du développement psychomoteur, cognitif et linguistique dans l'apprentissage du graphisme et de la graphomotricité. L'automatisation du geste graphique, qui s'effectue sur une longue période, est dépendante de l'âge et/ou du niveau d'expertise des scripteurs, mais aussi du contexte de production ou de la complexité des tâches. Des analyses de régression complémentaires menées par Rueckriegel et al. (2008) indiquent que cette automatisation serait atteinte vers 13 ans pour le tracé d'un cercle et vers 16 ans pour la copie d'une phrase, l'écriture étant, dès lors, dirigée par des programmes moteurs spécifiques. Il faut cependant noter que les participants écrivaient, dans cette étude, avec un crayon sans encre, empêchant le recours aux informations visuelles, ce qui pourrait avoir complexifié la nature ou le déroulement des processus en jeu.

Dans une étude italienne menée auprès de 218 élèves âgés de 8 à 14 ans, Accardo, Genna et Borean (2013) ont étudié l'évolution de différentes variables spatiotemporelles de l'écriture en fonction du développement psychomoteur, à partir de quatre tâches variant en complexité : a) l'écriture d'une séquence répétitive (i.e. la syllabe *uno*), b) le rappel écrit de chiffres en ordre ascendant, c) la copie d'une phrase le plus lisiblement possible, et d) la copie d'une phrase le plus rapidement possible. Les résultats de cette étude montrent que le nombre de caractères produits augmente tout au long de la scolarité pour les deux premières tâches, alors que la durée de production totale diminue jusqu'à 12 ans pour les deux suivantes. Ils montrent également une augmentation, avec l'âge, de la vitesse, du nombre de traits par seconde et du nombre de lettres par centimètre, ainsi qu'une diminution du nombre de traits par lettre; ces résultats témoignent, selon Soppelsa et Albaret (2014), d'une évolution monotone de la fréquence d'inscription, du temps de planification motrice, de l'arrangement spatial et de l'automatisation graphomotrice.

Dans la même lignée, Kandel et Perret (2014) ont montré que le renforcement des programmes moteurs, qui se traduit notamment par un phénomène d'anticipation graphomotrice, émerge vers l'âge de 9 ans. Cette étude menée auprès de 66 élèves français montre une diminution de la longueur du tracé et du nombre de pics de vitesse entre 8 et 9 ans lors de la copie des digraphes « ll », « le » et « ln ». Ces mêmes chercheurs ont confirmé, dans une deuxième étude menée auprès de 64 élèves français (*Ibid.*, 2015), une diminution du temps de latence, de la durée de production par lettre et du nombre de pics de vitesse entre 8 et 9 ans dans une tâche de copie de mots : « The decrease is mainly due to motor maturation and practice. Sensory-motor maps are stable and can be accessed easily. Writing movements are fast and smooth. They require less sensory control, which result in a decrease in cognitive load¹⁹ » (p. 333).

Plus récemment encore, Thibon et al. (2018a) ont montré, au cours d'une tâche de copie de lettres isolées ou de séquences de lettres variant en complexité, une diminution entre l'âge de 6 et 8 ans de la durée de production, de la longueur du tracé et de la dysfluente, ainsi qu'une augmentation de la vitesse. Les résultats de cette étude menée auprès de 98 élèves français de 7 à 9 ans montrent une période de stabilité des paramètres spatio-temporels des mouvements d'écriture entre 8 et 9 ans. Cette transition témoigne d'une automatisation progressive du geste associée à une amélioration du contrôle moteur et à une augmentation de la taille de l'unité impliquée dans la programmation graphomotrice. Ces différences sur le plan développemental ont été confirmées dans une autre étude menée par ces chercheurs, portant cette fois sur les mouvements de pointage et de rotation (Thibon, Barbier, Vilain, Sawallis, Gerber et Kandel, 2018b).

De l'ensemble de ces recherches, plusieurs consensus peuvent être dégagés quant à l'évolution, au cours du développement, des caractéristiques spatiales, temporelles, cinématiques et/ou dynamiques du geste graphomoteur. Bien qu'il soit impossible, dans la

¹⁹ Cette diminution est principalement due à la maturation motrice et à la pratique. Les représentations visuelle et motrice des lettres sont stables et facilement accessibles. Les mouvements d'écriture sont rapides et fluides. Ils nécessitent moins de contrôle visuel et kinesthésique, ce qui entraîne une diminution de la charge cognitive en mémoire de travail [traduction libre].

pratique, de se livrer à une « chronométrie des processus mentaux » (Zesiger, 1995, p. 24), les résultats mis de l'avant montrent que l'amélioration des habiletés graphomotrices se traduit par une diminution de la taille des lettres et de leur variabilité, de la durée de production, de la pression, du nombre et de la durée des pauses, et par une augmentation de la qualité du tracé, de la fluidité et de la vitesse (Accardo et al., 2013; Afonso, Suarez-Coalla, Gonzalez-Martin et Cuetos, 2017; Alamargot et Morin, 2015; Barrientos, 2016; Bosga-Stork et al., 2015; Chartrel et Vinter, 2008; Gonzalez-Martin, Suarez-Coalla, Afonso et Cuetos, 2017; Guilbert et al., 2018a; Kandel et Perret, 2014, 2015; Meulenbroek et Van Galen, 1986, 1988; Palmis et al., 2017; Rueckriegel et al., 2008; Thibon et al., 2018a, 2018b; Wagner et al., 2011; Wicki et al., 2014; Wicki et Hurschler Lichtsteiner, 2018; Zesiger, 1992).

La graphomotricité se développe donc graduellement à l'école primaire, entre 6 et 12 ans, s'accélégrant, s'assouplissant et se stabilisant, en tenant compte des diverses contraintes, grâce au maintien du tonus et de la posture, au contrôle de la force et de la pression et à la mise en place des synergies musculaires. Chez certains, cependant, la production écrite reste lente et peu lisible : entre 10 % et 30 % des élèves présentent des difficultés graphomotrices, selon leur âge et les critères choisis pour définir le trouble, se manifestant par une surutilisation des informations sensorielles, une grande variabilité spatiale, temporelle et cinématique, un manque de fluidité, une pression exagérée, une fatigue musculaire accrue, ainsi qu'une durée ou une fréquence de pauses plus élevée (Feder et Majnemer, 2007; Graham, Struck, Santoro et Berninger, 2006; Hamstra-Bletz et Blöte, 1993; Karlsdottir et Stefansson, 2002; Overvelde et Hulstijn, 2011; Pagliarini et al., 2015; Paz-Villagran, Danna et Velay, 2014; Prunty, Barnett, Wilmot et Plumb, 2013, 2014; Rosenblum et al., 2003; Rosenblum, Chevion et Weiss, 2006; Rosenblum, Weiss et Parush, 2004; Soppelsa et Albaret, 2014). Certains élèves demeurent donc incapables, en dépit d'un niveau d'instruction et d'exercice suffisant, de répondre aux exigences de qualité et de vitesse imposées par l'école. Pour ces scripteurs, et d'ailleurs pour tous les élèves qui commencent l'apprentissage de la langue écrite et qui n'ont pas encore ou très peu automatisé le tracé des différents allographes, et encore bien moins l'orthographe des mots, comme nous

l'aborderons plus loin dans ce chapitre, la production écrite représente une tâche complexe, un défi multiple consommant une grande part des ressources cognitives.

1.3 Facteurs explicatifs des changements développementaux : entre maturation, contraintes et stratégies

À partir de 9-10 ans, soit après la mise en place des programmes moteurs (Chartrel et Vinter, 2004, 2006, 2008; Guilbert et al., 2018a; Kandel et Perret, 2014; Palmis et al., 2017), les évolutions développementales sur les plans de la qualité du tracé et de la dynamique du mouvement d'écriture sont mineures, le geste graphomoteur continuant tout de même de s'automatiser jusqu'à l'adolescence (Alamargot et Morin, 2015; De Ajuriaguerra et al., 1971; Palmis et al., 2017; Rueckriegel et al., 2008). Différents facteurs permettent d'expliquer, comme nous le verrons à présent, les changements observés pendant l'enfance sur le plan développemental.

1.3.1 Distalisation progressive du mouvement

Le développement de la graphomotricité doit être considéré dans le cadre plus large de l'apprentissage moteur et de la maturation motrice, qui permet de coordonner les articulations proximales et distales (De Ajuriaguerra et al., 1971; Thibon et al., 2018b).

Selon Chartrel et Vinter (2004, 2006), les articulations proximales comme l'épaule et le coude sont responsables, pour gérer les caractéristiques de notre système alphabétique, des mouvements de translation de gauche à droite et du haut vers le bas. Ces articulations permettent le contrôle des composantes topocinétiques de l'écriture, largement dépendantes des informations sensorielles, qui assurent l'agencement spatial des caractères dans l'espace graphique. Les articulations distales, comprenant le poignet et la main, interviennent quant à elles dans le contrôle des composantes morphocinétiques de l'écriture, assimilées essentiellement à l'école, qui correspondent à l'ensemble des trajectoires permettant la production des formes caractéristiques de chaque lettre.

Le système effecteur possède en écriture 26 degrés de liberté, ce qui correspond au nombre d'axes de rotation articulaires autour desquels les membres peuvent se déplacer, et

implique plus d'une quarantaine de muscles (Zesiger, 1992). Cette synergie musculaire permet d'agencer le texte sur la feuille, les mots sur les lignes et les lettres dans les mots, de placer les signes diacritiques, de respecter la liaison entre les lettres ou de contrôler la pression induite par le crayon (*Ibid.*, 1995). Apprendre à écrire consiste donc à acquérir à la fois un ensemble de topocinèses – variant selon les cultures et les systèmes d'écriture – et un ensemble de morphocinèses – responsables de la production de toutes les variations allographiques d'une lettre – qui permettent à eux deux de savoir où et comment tracer les lettres (Chartrel et Vinter, 2004).

Sur un plan développemental, la maturation des articulations proximales intervient avant celle des articulations distales, ce qui explique en grande partie la difficulté rencontrée par les enfants en bas âge dans la production des lettres de petite taille (Vinter et Zesiger, 2007). Les mouvements guidés par les articulations proximales sont en effet plus larges, impulsifs et imprécis. Grâce à la maturation motrice, les enfants apprennent à mieux contrôler les articulations distales ce qui leur permet de gagner en aisance, en vitesse et en fluidité, tout en diminuant l'amplitude des mouvements (Thibon et al., 2018b).

1.3.2 Passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif du mouvement d'écriture

En début d'apprentissage, les élèves sont sous la dépendance d'un contrôle rétroactif ou en boucle fermée. En d'autres mots, la production écrite est lente et laborieuse, les mouvements périphériques étant façonnés et régulés par une utilisation massive, directe et continue des informations sensorielles, visuelles et/ou proprioceptives. Le mouvement, qui n'est pas programmé avant le début de l'action, est donc continuellement ajusté au cours de la production écrite sur la base du feedback, ce qui permet de corriger en temps réel l'écart entre le mouvement souhaité et le mouvement exécuté. À l'évidence, ce mode de contrôle ne peut s'appliquer qu'à des mouvements dont la durée est suffisamment importante pour permettre à ces modifications d'être apportées, autrement dit pour que les informations sensorielles puissent être recueillies, interprétées et utilisées en retour (Jolly et Gentaz, 2013; Masaki et Sommer, 2012).

Après plusieurs années de pratique, les scripteurs développent une représentation interne de la forme des lettres et des mouvements correspondants, car le recours au feedback sensoriel pour contrôler les mouvements n'est plus compatible avec les contraintes temporelles élevées et les corrections rapides qu'impose l'écriture (Bara et Gentaz, 2010). Ils peuvent donc écrire lisiblement et rapidement, grâce au développement des programmes moteurs, en l'absence d'informations sensorielles sur le mouvement en cours ou sur la trace produite. Les commandes motrices nécessaires pour tracer correctement les lettres sont ainsi prédéfinies en amont, au niveau central, les paramètres du geste étant anticipés avant le déclenchement du mouvement (Danna et Velay, 2015; Masaki et Sommer, 2012).

Pour reprendre l'essentiel, les élèves apparaissent dépendants de la présence d'informations rétroactives aussi bien pour la production des morphocinèses que des topocinèses en début de scolarité, alors que cette dépendance est essentiellement restreinte, à partir de 9-10 ans, aux mouvements topocinétiques (Vinter et Zesiger, 2007). En effet, la production des lettres s'émancipe peu à peu du contrôle visuel puisque leur forme est connue et maîtrisée; la taille de l'unité sur laquelle porte la planification motrice passe ainsi graduellement, avec la mise en place des programmes moteurs, du segment à la lettre, voire en une unité plus grande telle que la syllabe ou le mot (Bara et Gentaz, 2010; Chartrel et Vinter, 2008; Guilbert et al., 2018a; Marcelli et al., 2013).

Même si ce mode de contrôle en boucle ouverte devient dominant avec la pratique, il n'est pas exclusif chez les adultes. De fait, la contribution respective du feedback et des programmes moteurs dépend de la tâche à réaliser – notamment de sa complexité – et de l'expertise du scripteur (Alamargot et Morin, 2015; Guilbert et al., 2018a; Jolly et Gentaz, 2013).

1.3.3 Passage d'un contrôle visuel à un contrôle proprioceptif du mouvement d'écriture

En plus d'une réduction globale de l'utilisation du feedback, une expertise accrue en matière de graphomotricité peut s'expliquer par un changement progressif de l'équilibre

entre le contrôle visuel et le contrôle proprioceptif des mouvements d'écriture (Danna et Velay, 2015).

Comme le montrent les études centrées sur l'apprentissage moteur, les élèves ne disposent pas encore, en début d'acquisition, d'une référence kinesthésique du mouvement et privilégient par conséquent les informations visuelles pour évaluer la qualité du tracé (De Ajuriaguerra et al., 1971). Au fur et à mesure de la pratique, ces dernières sont peu à peu délaissées dans le contrôle du mouvement au profit des informations proprioceptives. Celles-ci, ayant été mémorisées graduellement entre 7 et 11 ans (Ferrel-Chapus, Hay, Olivier, Bard et Fleury, 2002; Guilbert et al., 2018a; Guilbert, Molina et Jouen, 2016), contribuent à la bonne exécution du geste et à la capacité d'ajuster les mouvements au cours de l'écriture en modifiant ou en corrigeant les trajectoires erronées (Alamargot et Morin, 2015).

Dans cette perspective, Chartrel et Vinter (2006) ont montré que la suppression des informations visuelles, qui ont une fonction à la fois exproprioceptive, contrôlant l'agencement spatial des mots sur la ligne, et proprioceptive, contrôlant le déroulement de la séquence des traits formant les lettres, affectait davantage l'écriture des enfants âgés entre 8 et 10 ans que celle des adultes. En l'absence de feedback visuel, seule une augmentation de la pression était observée chez les adultes. Chez les enfants toutefois, et en particulier pour les plus jeunes, la suppression de la vision entraînait un recours accru aux informations proprioceptives et tactilo-kinesthésiques, se manifestant par une augmentation de la pression, de la fluidité, de la vitesse et de la longueur du tracé. Cette stratégie adaptative favoriserait un contrôle plus proactif de l'écriture. Selon ces chercheurs, un certain niveau d'automatisme est atteint en écriture vers l'âge de 10 ans grâce à la mise en place des programmes moteurs, l'allègement avec l'âge de la dépendance aux informations rétroactives témoignant « de l'efficacité croissante des processus proactifs dans la formation des trajectoires » (*Ibid.*, p. 61). Les informations visuelles et proprioceptives s'intègrent d'ailleurs à cette période ce qui permet aux enfants de corriger, comme les adultes, les mouvements qu'ils effectuent en temps réel (Ferrel-Chapus et al., 2002).

Le feedback visuel ne semble donc pas, comme le soulignent Van Doorn et Keuss (1992), un préalable indispensable chez les experts : « Although adult writing undergoes specific changes, without vision, control is not impaired [...]. Vision is not a strict prerequisite for movement control and the consistent production of shapes in handwriting²⁰ » (p. 284). Comme nous l'avons déjà abordé dans ce chapitre, les mouvements de ces individus peuvent en effet, en raison de la programmation graphomotrice qui s'effectue en amont, se déployer de façon relativement stable, indépendamment du contexte et du support.

1.3.4 Modèles internes de l'action et anticipation motrice

La maîtrise de la graphomotricité dépend, comme nous l'avons précisé en problématique, de la mise en place d'une correspondance entre les représentations visuelle et motrice des lettres. Cette association pourrait être facilitée par la mémorisation de modèles internes de l'action (Danna et Velay, 2017).

Ces derniers, qui s'actualisent en phase d'apprentissage, reposent sur une connaissance intériorisée des caractéristiques physiques du corps, du monde extérieur et de leurs interactions (Wolpert, Ghahramani et Jordan, 1995). Ils font référence à l'instauration de mécanismes de contrôle prédictifs et rétroactifs qui, en combinant plusieurs sources d'informations sensorielles (e.g. visuelles, tactiles et kinesthésiques), permettent de prédire le mouvement et de le contrôler.

Plus généralement, l'apprentissage moteur dépend a) d'un contrôle direct (i.e. *feedforward*), qui permet de prédire de manière causale la conséquence sensorielle d'un mouvement et sa dynamique temporelle compte tenu de l'état actuel du système et de la commande motrice (les actions, fonctionnant en boucle ouverte, étant donc basées sur des signaux qui ne sont pas affectés par les sorties motrices du système), et b) d'un contrôle inverse, qui permet d'utiliser les informations sensorielles qui ont provoqué une transition d'état particulière pour mettre à jour les commandes motrices (les actions, fonctionnant en

²⁰ Bien que l'écriture des adultes subisse des modifications, sans vision, le contrôle du geste graphomoteur n'est pas compromis. La vision n'est pas indispensable à la production de lettres conformes au modèle allographique [traduction libre].

boucle fermée, étant ainsi basées sur une comparaison entre les informations sensorielles prédites et celles obtenues dans le cours du mouvement). Cette conjoncture «prédiction-observation» permet au système de lancer de manière flexible des actions correctives lorsqu'une disparité entre les réafférences anticipées et celles qui accompagnent le résultat du mouvement est détectée, ce qui régule les mouvements suivants et améliore les actions futures (Masaki et Sommer, 2012; Wolpert, Diedrichsen et Flanagan, 2011).

Comme les modèles directs constituent une représentation anticipée du mouvement, ils permettent d'estimer et d'utiliser le résultat d'une action avant que le retour sensoriel ne soit disponible. Ce contrôle proactif est alors lié, grâce aux ajustements qu'il apporte de manière inconsciente, involontaire ou encore automatisée, à l'expertise – contrairement au contrôle rétroactif qui est, comme mentionné précédemment, trop lent pour les mouvements rapides tels que ceux qu'exige l'écriture. Ainsi, la qualité du mouvement (i.e. sa précision et sa vitesse) dépend de la qualité des modèles internes de l'action ou de celle des programmes moteurs, qui représentent pour certains des synonymes²¹ (Danna et Velay, 2015; Palmis et al., 2017), qui se raffinent jusqu'à l'âge adulte (Assaiante, Barlaam, Cignetti et Vaugoyeau, 2014; Guilbert et al., 2016). L'acquisition de ces représentations constitue un ingrédient clé de l'apprentissage d'un nouveau geste, du contrôle anticipatif et de toute adaptation sensorimotrice (Guilbert, Jouen et Molina, 2018b; Halsband et Lange, 2006; Lebon, Gueugneau et Papaxanthis, 2013; Masaki et Sommer, 2012).

L'existence des modèles internes permet de comprendre les mécanismes en jeu dans l'imagerie motrice, activité pendant laquelle aucun mouvement n'est produit et donc pour laquelle aucun retour sensoriel n'est dirigé vers le système nerveux central. Ces modèles, en permettant une prédiction des conséquences proprioceptives d'une action, expliquent l'équivalence temporelle – et son évolution au cours de l'apprentissage – entre les mouvements exécutés et les mouvements simulés mentalement. En effet, la capacité à utiliser ou à intégrer de manière conjointe les afférences visuelles et proprioceptives dans le contrôle

²¹ Les modèles internes, les programmes moteurs et les schémas corporels se fondent chacun sur des représentations spatiales et temporelles du mouvement (i.e. structures internes) qui permettent de le déclencher, de le piloter et de le corriger.

d'une action, habileté qui émerge vers 7 ans et se renforce vers 9 ans, permet une activation du système sensorimoteur lors d'une simulation de l'action sans qu'aucune commande motrice ne soit transmise aux effecteurs (Ferrel-Chapus et al., 2002; Guilbert et al., 2016; Louis-Dam, Orliaguet et Kandel, 2000).

À la lumière de ce qui précède, nous pouvons constater que le contrôle du geste graphomoteur évolue, en fonction de la maturation motrice et de la pratique, d'une stratégie rétroactive, où prédomine le feedback visuel, à une stratégie proactive, rendue nécessaire en raison d'une augmentation de la vitesse d'écriture qui réduit le temps disponible pour tenir compte du feedback. Ces progrès ne sont pas étrangers à la formation des programmes moteurs, dont l'élaboration s'appuie sur différentes sources d'informations sensorielles, ni à celle des modèles internes de l'action, notion de première importance dans la théorie du contrôle moteur (Bara et Gentaz, 2010; Guilbert et al., 2018a; Jolly et Gentaz, 2013).

Certes, ces facteurs contribuent à expliquer les changements développementaux qui s'observent au cours de l'apprentissage, tant sur le plan de la qualité du tracé que de la vitesse de l'écriture. Ils sont toutefois insuffisants à eux seuls pour expliquer comment les élèves passent, en fonction des ressources cognitives dont ils disposent, du statut d'apprenti-scripteur à celui d'expert.

Effectivement, comment l'apprentissage des processus de bas niveau en écriture peut-il conduire à des changements relativement permanents au niveau de la performance? Comment ces changements évoluent-ils, dans un système à capacité limitée, en fonction de la pratique? Comment les connaissances et les savoir-faire s'articulent-ils en fonction du développement cognitivo-moteur? Pourquoi la notion de groupement (i.e. *chunking*) est-elle liée à l'expertise? Quels sont les stades²² qui permettent d'aboutir à une automatisation des programmes moteurs? Pour répondre plus précisément à ces questions, nous proposons de

²² Les « stades », terme employé en référence au modèle d'Anderson (1983), désignent ici une étape, un palier ou une phase dans le découpage de la chronologie du processus d'acquisition de la graphomotricité. Les stades ne dépendent pas seulement de l'âge des élèves ou de leur niveau d'expertise, mais également des contraintes et de la complexité des tâches ou sous-tâches. Ils ne sont donc pas exclusifs, n'ayant pas de frontières strictes et pouvant coexister au sein d'une même tâche (cette notion est abordée dans la section 1.4.2.4 du deuxième chapitre).

formaliser le développement des habiletés graphomotrices en trois « phases temporelles » à partir du modèle *Adaptive Control of Thought* (ACT : Anderson, 1983), qui modélise l'acquisition des habiletés complexes par l'action. Comme nous le verrons dans la prochaine section, cette théorie de l'apprentissage permet, en offrant une grille d'analyse et d'interprétation adéquate de l'architecture cognitive, de mieux comprendre comment se développe l'expertise en écriture – comparée à une véritable résolution de problèmes (Bereiter et Scardamalia, 1987) – en fonction des capacités du scripteur et des contraintes de l'activité.

1.4 Proposition de formalisation du développement graphomoteur à partir du modèle ACT d'Anderson (1983)

Dans les vingt dernières années, quelques études menées en psychologie cognitive ont eu recours au modèle d'Anderson (1983) pour éclairer, notamment grâce à ses principes d'activation et de diffusion de l'information, le développement de la production écrite (Alamargot, 1997; Galbraith, 1999; Van den Bergh et Rijlaarsdam, 1999; cf. Chanquoy et Alamargot, 2002). Même si ces principes s'avèrent efficaces pour modéliser l'acquisition des habiletés complexes, aucune étude, à notre connaissance, n'y a encore fait référence dans le domaine de la graphomotricité.

Le modèle ACT (Anderson, 1983) permet pourtant, en décrivant de manière efficace les relations entre les connaissances déclaratives, les savoir-faire et la mémoire de travail, de comprendre plus finement le développement des processus graphomoteurs dans un système à capacité limitée (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996) et leur influence sur les traitements orthographiques.

Ce modèle comprend trois composantes principales : a) la mémoire déclarative, composée de concepts interconnectés, b) la mémoire procédurale, comportant des règles de production de type « condition-action », et c) la mémoire de travail, envisagée comme une fenêtre transitoire représentant des unités activées en mémoire à long terme.

Ces différentes composantes permettent de transférer, d'organiser, d'interpréter, d'utiliser et de transformer de façon stratégique les informations en provenance de

l'environnement. Comme l'illustre la figure 2, ces traitements sont assurés par 7 processus :

a) *Encodage* : il permet aux informations sensorielles et aux stimuli d'être appréhendés et analysés en mémoire de travail, b) *Stockage* : il assure le maintien et la consolidation des représentations en mémoire à long terme, c) *Récupération* : il restitue une connaissance ou une information préalablement apprise, d) *Appariement* : il met en correspondance les connaissances déclaratives aux prémisses ou aux conditions des règles de production nécessaires à la réalisation de la tâche, e) *Exécution* : il transfère en mémoire de travail la partie « action » des règles de production dont l'appariement a réussi, f) *Application* : il met en œuvre un cycle de production en fonction du but de l'activité, et g) *Performances* : il met en pratique l'action correspondante.

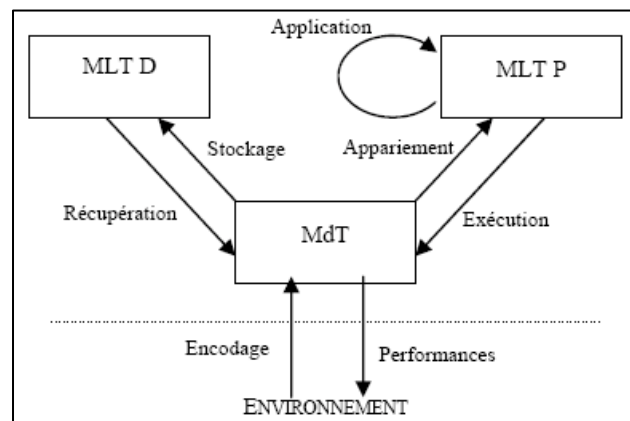


Figure 2 : Cadre général du modèle ACT d'Anderson (1983)

1.4.1 Connaissances déclaratives et procédurales

Selon le modèle ACT, la mémoire est le soubassement de toute activité humaine. Elle représente, comme le souligne Piolat (2004), une « cheville ouvrière des activités cognitives complexes et de leur acquisition » (p. 55).

La mémoire déclarative contient des connaissances conceptuelles, factuelles ou encyclopédiques codées sous la forme de propositions, d'images mentales ou de chaînes temporelles (tricode), organisées selon une structure hiérarchique dite mixte et enchevêtrée au sein d'un réseau sémantique (Anderson, 1983, 1996). Les unités de connaissances appelées aussi *chunks* ou nœuds bénéficient d'un poids ou d'un potentiel d'activation et d'inhibition variable (i.e. *strength*), facilitant plus ou moins leur recouvrement en mémoire

de travail en fonction de leur fréquence d'utilisation – et donc de la pratique. Selon le modèle, la récupération des unités s'opère, comme c'est le cas dans un système connexionniste, par diffusion de l'activation : si une sonde mémorielle élaborée à partir des informations extraites de l'environnement et/ou des règles de production active une unité en mémoire de travail, l'activation se propage automatiquement, dans le réseau, aux concepts qui y sont rattachés. Si le potentiel d'activation est suffisant pour atteindre un seuil donné, ces unités émergent, à leur tour, en mémoire de travail. Le potentiel d'activation de chaque nœud détermine donc la probabilité et la vitesse de récupération des connaissances – autrement dit des ressources cognitives disponibles, à un moment précis, dans le système cognitif. L'expertise est ainsi considérée, par Anderson (1992), comme une augmentation du potentiel général d'activation sous l'effet de la pratique : plus une unité est utilisée, plus son activation se propage facilement dans le réseau; plus le nœud est fort, du fait d'un apprentissage important, plus il sera reconnu et restitué rapidement. Renforcer les liens existants entre deux concepts permet donc, en restreignant le coût du maintien d'une unité particulière, d'activer en parallèle d'autres unités de connaissances, ce qui facilite la mise en œuvre de traitements plus nombreux et/ou plus complexes (Alamargot et Chanquoy, 2001).

Pour leur part, les connaissances procédurales ou les savoir-faire concernent l'utilisation, dans une tâche donnée, des connaissances déclaratives (i.e. quand, pourquoi et comment y recourir). Elles sont formalisées par des règles de production conditionnées par des routines et des buts, composées de leur condition d'application et de leurs instructions de traitement (e.g. SI le but est de produire tel résultat... et SI une série de conditions est présente... ALORS telle action doit être réalisée). Selon Anderson (1982, 1983, 1996), la mémoire procédurale contient plusieurs milliers de règles chez l'expert, regroupées pour un problème donné en un système de production sériel, dont certaines sont très complexes et d'autres très simples, très spécifiques ou très générales. Chaque règle bénéficie d'un potentiel d'activation unique, dont la force dépend du nombre de reprises où cette règle a été appliquée avec succès dans un contexte particulier. Les opérations, lorsqu'elles ont été automatisées par une longue pratique, se déclenchent de façon involontaire, rapide et irrépessible, sans interruption et sans contrôle cognitif particulier. Ainsi, le système de production peut

s'optimiser avec l'expertise, aboutissant, comme nous l'aborderons prochainement, à une accélération et à une encapsulation des traitements.

Selon Lépine, Roussel et Fayol (2003), les connaissances déclaratives sont spécifiques et activées par l'attention portée aux éléments qu'elles encodent (i.e. *data-driven processing*), alors que les connaissances procédurales, abstraites, modulaires et donc peu sensibles aux interférences, sont activées par des buts (i.e. *goal-directed processing*). Pour Anderson (1982, 1983), la maîtrise des connaissances déclaratives précède toujours celle des connaissances procédurales, puisqu'il est nécessaire de connaître les conditions d'application des procédures pour pouvoir les exécuter – donc pour savoir ce qui doit être fait sous certaines circonstances et/ou avec certaines informations. Ces deux types de connaissances, s'influençant l'un l'autre, sont un couple en « permanente interaction » (Alamargot, 2001, p. 22), étant insuffisants à eux seuls pour réaliser une activité. Le processus d'appariement assure leur articulation (Alamargot et Chanquoy, 2001). Il a pour fonction d'insérer pendant l'activité les unités de connaissances déclaratives activées en mémoire de travail dans les prémisses, les propositions ou les *slots* des règles de production (e.g. SI... unité déclarative X... ALORS... traitement Y), tant et aussi longtemps que le système n'a pas été procéduralisé.

L'acquisition des connaissances par l'action repose, selon ce modèle, sur une restructuration progressive, consécutive à la pratique d'une activité, du système procédural et du réseau déclaratif. La prochaine section est consacrée aux trois stades qui, aboutissant à une automatisation des connaissances procédurales, caractérisent selon Anderson (1983) le processus d'acquisition des habiletés complexes.

1.4.2 Acquisition des habiletés complexes en trois stades

Selon Anderson (2000), l'expertise, qui se manifeste notamment par une vitesse d'exécution rapide, repose sur a) l'apprentissage des connaissances déclaratives, b) le développement des règles de production, et c) le renforcement et le raffinement des connaissances procédurales au moyen de la pratique.

1.4.2.1 Stade déclaratif

Au stade déclaratif²³, l'individu réalise une action, de façon lente et hautement contrôlée, en verbalisant ce qu'il fait. Au jeu d'échecs, un novice déplacera par exemple une pièce en se rappelant à haute voix les règles de mouvement et de prise de pions apprises. En écriture, les lettres seront formées, à l'aide des informations sensorielles, par la juxtaposition de petits segments ou de traits. Puisque l'individu ne dispose pas encore de connaissances procédurales, ayant été peu souvent confronté à la tâche, sa performance ne peut être établie que sur la base des connaissances déclaratives préalablement emmagasinées et/ou des informations fournies par l'environnement (e.g. consignes, instructions, observation d'un modèle, imitation). Ces connaissances, qui ne sont pas encore reliées à un système de production, sont interprétées par des procédures générales de résolution de problèmes qui permettent d'accomplir l'action tout au moins avec une approximation grossière. L'individu procède donc par exploration, tâtonnement ou essai-erreur en mettant en œuvre une stratégie générique qui pourrait être appliquée à d'autres situations. Il peut également recourir à des analogies pour adapter ou transformer des règles connues et déjà maîtrisées, propres à un domaine de connaissances, à un autre domaine. Même si ce système de base permet de produire, avec une efficacité relative, des réponses adaptées aux contraintes de la tâche, en rassemblant diverses procédures éparses, il consomme d'importantes ressources cognitives, ce qui limite son application. Ce stade est donc particulièrement coûteux cognitivement, car il nécessite une analyse consciente de chacune des actions engagées pour réaliser, petit à petit, l'activité.

1.4.2.2 Stade de compilation

Le stade de compilation²⁴ correspond à la mise en place d'un système de production intégrant les conditions d'utilisation des connaissances déclaratives en fonction du contexte. Les premières procédures interprétatives, plutôt décousues et parcellaires, sont donc transformées en un système spécifique, plus homogène, dédié à la tâche. Les traitements,

²³ Le stade déclaratif est similaire au « stade cognitif » de Fitts (1964) : les connaissances déclaratives sont utilisées consciemment pour exécuter la tâche et les traitements mobilisent fortement les ressources cognitives.

²⁴ Le stade de compilation est similaire au « stade associatif » de Fitts (1964) : les connaissances deviennent plus difficiles à verbaliser et les traitements mobilisent moins de ressources cognitives.

consommant moins de ressources cognitives, sont alors accélérés. Aux échecs, l'individu déplacera une pièce sans rappeler à haute voix les règles de mouvement et de prise de pions pendant qu'il joue, puisqu'elles sont maintenant internalisées. En écriture, les lettres, formées par l'intermédiaire d'un programme moteur, seront tracées lisiblement et rapidement même en l'absence d'un contrôle visuel pour superviser la trace. Les erreurs sont graduellement détectées et corrigées, et la médiation verbale, fortement à l'œuvre à la phase déclarative, est peu à peu mise de côté : « the skill makes a transition from a slow and deliberate use of the knowledge to a more direct representation of what to do. It becomes a lot more fluid and error free [...]. People stop using general problem-solving methods and start using methods specific to the problem domain²⁵ » (Anderson, 2000, p. 310). Le stade de compilation est assuré par deux mécanismes : a) la *composition* permet, pour un problème donné, de réunir au sein d'une seule et même production une suite ordonnée d'opérations poursuivant un objectif commun. Ce processus permet donc, en créant des macroproductions qui renferment ou incarnent les conditions d'application des différentes règles de production, de réduire le nombre d'étapes nécessaires pour réaliser une tâche – les actions n'étant plus, comme le souligne Alamargot (1997), morcelées sur le plan de l'exécution; b) la *procéduralisation* permet, en particulierisant ce contenu à une activité donnée, grâce à la pratique, d'élaborer de nouvelles versions des règles de production dont l'appariement en mémoire de travail de leurs conditions d'application avec les unités de connaissances déclaratives correspondantes n'est plus nécessaire. Cette étape désigne le processus par lequel l'individu passe des connaissances déclaratives aux règles de production. Elle se solde, en restreignant le recours au processus d'appariement, par une accélération des traitements et une diminution de leur coût cognitif.

²⁵ Les connaissances déclaratives passent d'une utilisation lente et délibérée à une représentation plus directe de ce qu'il faut faire. La tâche est effectuée avec fluidité et efficacité. Les individus cessent d'utiliser des procédures générales de résolution de problèmes et commencent à utiliser des méthodes spécifiques au domaine [traduction libre].

1.4.2.3 *Stade de tuning*

Le stade de réglage ou de *tuning*²⁶ permet à l'individu d'opérer des traitements plus complexes et/ou plus élaborés en combinant ou en ajustant, stratégiquement, plusieurs procédures déjà automatisées. Ce processus métacognitif entraîne une restructuration profonde des systèmes de production instaurés en mémoire procédurale, notamment en établissant de nouveaux choix de traitements ou en reconsidérant l'ordre d'application des procédures. Les règles apprises, au fil du temps, sont assouplies : « Learning involves an improvement in the choice of method by which the task is performed [...]. A novice's search of a problem space is largely a matter of trial-and-error exploration. With experience the search becomes more selective and more likely to lead to rapid success²⁷ » (Anderson, 2000, p. 390). Le stade de *tuning* est celui qui distingue véritablement les experts des novices. Il est assuré par trois processus : a) la *généralisation*, qui permet, en combinant plusieurs règles de production similaires, de dépasser leur champ d'application stricte, b) la *discrimination*, qui, à l'inverse, restreint les conditions d'application des règles générales pour les adapter à des situations plus spécifiques, et c) le *renforcement*, qui détermine le potentiel d'activation de chacune des règles de production, selon la fréquence, la pertinence et la réussite de leurs applications – les règles les plus sollicitées étant renforcées, et les moins sollicitées, inhibées.

1.4.2.4 *Mobilisation de connaissances déclaratives et procédurales au sein d'une même tâche*

Selon Anderson (1982, 1983), la réalisation d'une tâche peut faire simultanément appel, en fonction des connaissances et des compétences qu'elle sollicite, à des procédures interprétatives et compilées. Ce serait notamment le cas en production écrite, puisque cette activité mobilise des processus de bas niveau, comme la graphomotricité et l'orthographe, pour lesquels les traitements peuvent être automatisés, et des processus de haut niveau,

²⁶ Le stade de *tuning* est similaire au « stade autonome » de Fitts (1964) : l'exécution de la procédure devient de plus en plus précise et rapide. Les routines sont automatisées, ce qui permet d'aborder la tâche dans son ensemble sans avoir à la décomposer en opérations élémentaires.

²⁷ L'apprentissage implique une amélioration du choix de la méthode pour exécuter la tâche. Les novices abordent les problèmes par essai-erreur. Avec la pratique, leur résolution devient plus sélective et plus susceptible de conduire à un succès rapide [traduction libre].

comme la planification, la formulation et la révision, qui imposent toujours, même chez les experts, de fortes demandes en mémoire de travail (Alamargot et al., 2005).

Comme le proposent Kim, Ritter et Koubek (2013) avec l'écriture dactylographique, les touches (e.g. # ou &) qui sont moins fréquentes, et donc insuffisamment pratiquées, nécessitent l'utilisation de connaissances déclaratives et le recours au feedback visuel pour retrouver leur emplacement exact sur le clavier. Par opposition, les touches et les enchaînements de touches les plus communs sont activés implicitement ce qui permet d'effectuer sur-le-champ, et sans nécessairement être en mesure de l'expliquer, les manœuvres précises sur le clavier – les doigts « sachant » précisément où se rendre. Autrement dit, un individu peut récupérer directement en mémoire à long terme, sans quitter du regard l'écran, la position d'une lettre fréquente sur le clavier (e.g. le *e*), et sans forcément être en mesure de verbaliser où cette lettre s'y situe (e.g. entre le *w* et le *r* sur un clavier QWERTY).

Ce même principe pourrait raisonnablement s'appliquer à l'écriture manuscrite : des lettres (e.g. le *k* ou le *z*), des combinaisons de lettres (e.g. *dh* ou *tb*) ou des allographes (e.g. majuscules) moins fréquents en français pourraient requérir des connaissances déclaratives au lieu de solliciter, plus directement, des programmes moteurs procéduralisés permettant leur production en une seule unité. Ainsi, la programmation de lettres peu fréquentes, peu familières et/ou plus complexes pourrait s'effectuer sur la base d'une succession de traits, alors que celle d'unités fréquentes, familières et/ou plus simples, progressivement intégrées par le scripteur au cours de ses nombreuses expositions à l'écrit, pourrait s'effectuer sur la base d'une succession de lettres (Bara et Gentaz, 2010). Par conséquent, certaines sous-tâches requises pour accomplir une tâche complexe pourraient se trouver à des phases différentes, l'une étant par exemple contrôlée, l'autre automatisée.

En somme, le processus d'apprentissage par l'action comprend, selon le modèle d'Anderson (1983), trois stades – soit la mise en mémoire de connaissances déclaratives de plus en plus élaborées, la procéduralisation des connaissances déclaratives et l'automatisation des connaissances procédurales – dont le passage de l'un à l'autre dépend

du type de tâches à accomplir, de leur complexité, de la rétroaction fournie et du temps de pratique. La figure 3 illustre, selon ces trois stades, la loi de la « puissance d'apprentissage », qui établit un lien entre le temps qu'il faut pour exécuter une tâche et le nombre de fois que cette tâche a été réalisée. Cette figure montre que la rétention de l'information est dépendante à son tour de la pratique : les connaissances déclaratives sont vite oubliées lorsqu'elles sont insuffisamment utilisées, ce qui peut mener à des erreurs, alors que les connaissances procédurales, qui ont bénéficié d'une pratique intensive et qui sont profondément intégrées, sont résistantes face au temps ou « immune to decay²⁸ » (Kim et al., 2013, p. 26).

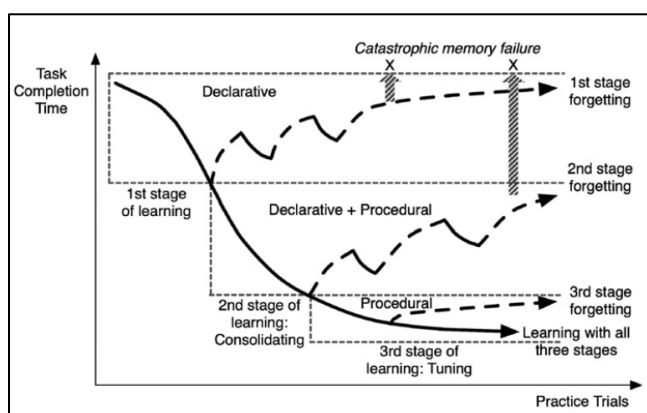


Figure 3 : Trois stades d'apprentissage selon le modèle ACT (Kim et al., 2013)

1.4.3 Automatisation des connaissances procédurales et mécanisme de chunking

Selon Anderson (2000), la programmation motrice fait appel à des connaissances procédurales : « A motor program is essentially the action (or THEN) part of a production rule²⁹ » (p. 331). Les programmes moteurs représentent, comme nous l'avons évoqué en début de chapitre, une série de commandes musculaires structurées avant le début de l'action (Thibon et al., 2018a). Comme le montre la figure 4, un individu qui prend le volant d'une voiture manuelle pour la première fois devra au départ concentrer son attention pour synchroniser la pression du pied sur l'embrayage et la manipulation du levier de vitesse, vraisemblablement au détriment de sa conduite, alors que le plus chevronné pourra réaliser

²⁸ Les connaissances procédurales sont immunisées contre le déclin de la mémoire [traduction libre].

²⁹ Un programme moteur est essentiellement la partie action (ou ALORS) d'une règle de production [traduction libre].

ces opérations rapidement, sans en prendre conscience, tout en restant attentif aux conditions de la route et en maintenant une conversation avec son passager. Les traitements gérés de manière sérielle par les novices, contrôlés donc largement coûteux sur le plan cognitif, sont ainsi remplacés graduellement, par la pratique, par des procédures implicites et automatisées regroupées au sein d'une production, pouvant être menées en parallèle avec d'autres traitements dans la limite des ressources disponibles (Alamargot et Chanquoy, 2001; Anderson, 1983, 1992). Les performances des individus évoluent donc, pour une tâche donnée, de l'application laborieuse d'un « algorithme général » à la récupération directe d'instances mémorielles (Kellogg, 2008; Logan, 1988).

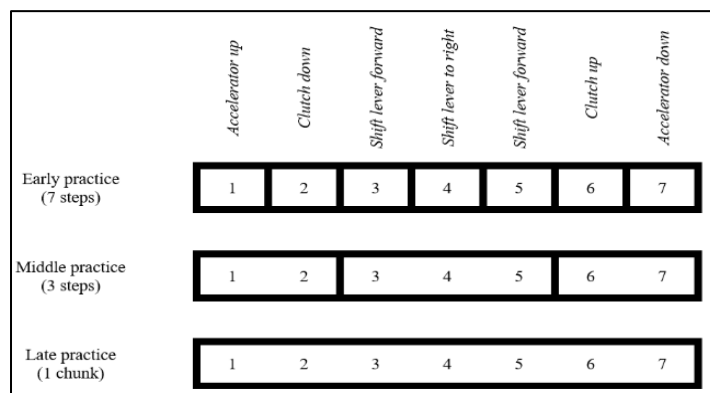


Figure 4 : Illustration du mécanisme de chunking (Anderson, 2000)

Comme nous pouvons le constater, l'acquisition des connaissances par l'action constitue, selon les trois stades de l'automatisation énoncés plus haut, un processus d'enrichissement cumulatif par lequel un individu doit acquérir, emmagasiner et fédérer chacun des éléments de connaissance en mémoire à long terme, mais aussi être capable de les récupérer et de mettre en œuvre les procédures appropriées ou les compétences adéquates en fonction de la situation qu'il aura à traiter. Un principe d'activation neuronal détermine quelles sont les connaissances déclaratives et procédurales à déployer selon le contexte (Anderson, 1996).

Le développement de l'expertise repose ainsi sur une restructuration du système procédural, suscitée par l'automatisation des traitements, qui entraîne en retour une modification du contenu et de l'organisation des unités de connaissances contenues dans la mémoire déclarative (Alamargot et Chanquoy, 2001). Le processus de composition modifie,

avec la pratique, le format de ces unités en agglomérant ou en emboîtant différents *chunks* : les connaissances déclaratives et procédurales, représentant les « atomes » de la cognition, peuvent ainsi être regroupées, à un niveau supérieur, en « molécules » (Anderson et Lebiere, 1998). Selon Anderson (1983), la pratique répétée d'une activité accroît le potentiel d'activation de ces unités, ce qui facilite leur diffusion dans le réseau sémantique. Ce principe d'activation explique, comme nous le verrons dans la prochaine section, l'augmentation de l'empan de la mémoire de travail en fonction de l'expertise : plus la taille des unités de connaissances est grande, plus la quantité d'informations susceptible d'être encodée ou restituée en un même cycle de traitement est élevée. Le modèle ACT est donc utile pour rendre compte de l'articulation des connaissances dans le système cognitif, mais aussi des conditions de déclenchement, pour un problème donné, des traitements en mémoire de travail (Chanquoy et Alamargot, 2002).

1.4.4 Rôle et conceptions de la mémoire de travail

La conception dominante de la mémoire distingue, en psychologie cognitive, deux registres, soit : a) la mémoire à long terme, dont la capacité de stockage est dite illimitée et la durée de rétention quasi-permanente, et b) la mémoire de travail, dont la capacité est limitée et la durée de rétention temporaire, assurant une double fonction : le stockage et le traitement conscient et volontaire des informations (Atkinson et Shiffrin, 1968).

1.4.4.1 Structure et fonctionnement dans les modèles d'activation

Selon le modèle d'Anderson (1983), qui possède une fonction énergétique, la mémoire de travail représente la partie activée de la mémoire à long terme, et non un registre à part entière. La taille de cette zone dépend de la somme totale d'activation dont peut disposer le système cognitif, essentiellement déterminée par a) le potentiel d'activation de chaque sonde mémorielle, et b) le potentiel d'activation initial des unités de connaissances récupérées (Alamargot et Chanquoy, 2001). Cet empan de traitement peut être majoré par une restructuration, grâce à la maturation et à la pratique répétée d'une activité, des connaissances déclaratives et procédurales; c'est ce qui permet aux experts d'activer et de

maintenir en mémoire de travail des représentations plus complexes et variées, ou plus enrichies et mieux organisées, que les novices.

1.4.4.2 Contrainte capacitaire

Just et Carpenter (1992), en empruntant certains principes aux modèles connexionnistes et symboliques, ont défini la mémoire de travail d'une manière similaire, quoique différente, à celle d'Anderson (1983). Selon eux, tous les processus impliqués dans la lecture, qui compétitionnent pour les mêmes ressources, peuvent s'exécuter simultanément. Toutefois, si la tâche requiert la mise en œuvre de plusieurs procédures et le stockage d'un nombre important d'informations, il est possible que les besoins, nécessaires pour l'accomplir avec succès, excèdent les ressources cognitives disponibles dans un réservoir attentionnel limité. Selon ces chercheurs, les différents traitements sous-jacents à la compréhension d'un texte interviennent en parallèle. Si le nombre de procédures à mettre en œuvre pour réaliser la tâche est trop important, autrement dit si la quantité d'activation que ces dernières essaient de propager excède la capacité totale du système, la propagation sera réduite afin de maintenir l'activation sous un seuil liminaire. Cette réduction ralentit alors le calcul ou la computation, le nombre de cycles de production nécessaire pour amener un élément au-dessus du seuil devant être incrémenté. Selon ce modèle, la capacité mémorielle d'un individu représente la quantité maximale d'activation qui est disponible en mémoire de travail pour réaliser les fonctions de maintien et/ou de traitement. Des individus qui ont un faible empan mnésique peuvent donc avoir de la difficulté à activer, à maintenir et à propager l'information à travers les nombreux systèmes linguistiques. Chez ces individus, les processus semblent encapsulés et indépendants les uns des autres; les traitements contrôlés sont effectués, avec peu de fluidité, de façon séquentielle. Ainsi, un faible lecteur maintiendra difficilement le sens d'une phrase en mémoire si l'identification d'un mot lui demande beaucoup d'efforts. À l'inverse, un individu qui possède des capacités mnésiques plus grandes pourra maintenir et coordonner plus facilement l'information en mémoire – les microsystèmes phonologique, morphologique, syntaxique, sémantique et lexical pouvant interagir entre eux, facilitant l'intégration des éléments en une représentation plus cohérente. On peut donc en déduire ici que la pratique, en modifiant le niveau de

connaissances initial et le coût cognitif des processus, via leur automatisation, permet d'augmenter l'interactivité et la récursivité des traitements en œuvre lors de la réalisation d'une tâche.

La réussite d'une activité complexe, que l'on pense à la conduite manuelle d'une voiture, au déplacement d'un pion sur un échiquier, à la résolution d'un problème mathématique, à la compréhension ou encore à la rédaction d'un texte, est donc « contrainte par la capacité limitée de ressources dont dispose l'individu » (Piolat, 2004, p. 58). Cette capacité, qui peut différer d'une personne à l'autre, limite le nombre de processus susceptibles d'être mobilisés et gérés en parallèle par un individu (Fayol, 2013).

Selon McCutchen (1996), la production écrite impose, à l'instar de la compréhension de textes, des exigences de stockage et de traitement considérables – notamment en raison de ses dimensions graphomotrice et orthographique – qui peuvent affecter, si ces deux fonctions sont compromises, l'ensemble de la performance. En effet, la composante graphomotrice et la gestion orthographique constituent, comme nous l'avons précisé en problématique, deux contraintes cognitives majeures de la production écrite : un coût cognitif trop élevé de ces processus peut affecter la qualité d'un texte, en raison d'une quantité de ressources insuffisante pour les processus liés à la planification ou à la révision du contenu. L'accès à l'expertise rédactionnelle semble donc sous la triple dépendance de la maturation du système nerveux central, qui entraîne une augmentation des capacités générales, du niveau de connaissances, qui détermine la richesse et la complexité du réseau sémantique, et de l'effet de la pratique, qui influence leur degré d'automatisation.

1.4.5 Hypothèse générale sur le développement des habiletés graphomotrices en trois « phases temporelles » menant à une automatisation des programmes moteurs

Nous avons vu jusqu'ici qu'il était possible, grâce à l'expertise dans un domaine, de récupérer et de traiter un plus grand nombre d'unités de connaissances en mémoire – que ce soit par le biais d'une augmentation du potentiel général d'activation (Anderson, 1983) ou d'une efficience croissante des fonctions de maintien et de traitement (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996).

L'automatisation des programmes moteurs, qui se produit vers l'âge de 15 ans (Alamargot et Morin, 2015; Rueckriegel et al., 2008), est dans les deux cas facilitée par le développement des capacités mémorielles. Selon Alamargot (2007), cette automatisation « repose sur une procéduralisation des programmes moteurs qui, d'abord déclaratifs, vont être progressivement encapsulés dans un système de production échappant à la conscience » (p. 4). La maturation et la pratique répétée de l'écriture permettent en effet aux scripteurs d'élaborer et de stocker en mémoire à long terme des programmes moteurs génériques pour chacun des allographes.

Comme nous l'avons souligné en début de chapitre, l'apprentissage de la graphomotricité se fait de manière progressive. En début d'acquisition, les élèves apprennent, le plus souvent grâce à l'imitation d'un modèle ou en suivant une grammaire de l'action, à initialiser et à enchaîner les bons mouvements afin de relier les traits constitutifs des lettres entre eux. Ils évaluent donc, au moyen d'un important contrôle visuel et kinesthésique, quels mouvements permettent la production des formes les plus lisibles, c'est-à-dire celles qui correspondent le mieux aux paramètres géométriques du modèle (Halsband et Lange, 2006; Louis-Dam et al., 2000; Thibon et al., 2018a, 2018b). Ils peuvent recourir pour ce faire à leurs connaissances antérieures, comme les règles de production motrice qu'ils ont préalablement emmagasinées pour le dessin, à des analogies ou aux informations fournies par l'environnement. À cette *phase déclarative*, l'action est lente, irrégulière, balbutiée ou inconsistante (Masaki et Sommer, 2012). Les lettres sont produites trait par trait, de manière consciente, avec un recours accru aux informations sensorielles permettant d'en gérer les aspects morphocinétiques et topocinétiques (Marcelli et al., 2013). L'emploi de procédures interprétatives et de stratégies génériques consomme d'importantes ressources cognitives. Les représentations doivent être, à cette phase, constamment réitérées dans le système cognitif en cas de perte d'informations en mémoire (Anderson, 1983).

Progressivement, une différenciation s'effectue. Les élèves apprennent à utiliser des règles de production spécifiques à l'écriture, particularisées pour chaque allographe. Ils parviennent donc à établir un lien entre les informations sensorielles et les commandes motrices, ce qui renforce les représentations visuelle et motrice des lettres – phénomène qui

consomme toujours d'importantes ressources cognitives en début d'acquisition, ce qui réduit la vitesse et la précision du tracé (Halsband et Lange, 2006). Avec la pratique, ces représentations se stabilisent en mémoire procédurale de manière de plus en plus implicite, ce qui permet aux mouvements d'être produits avec moins de contrôle ou de feedback. À cette *phase de compilation*, les élèves n'ont plus besoin, grâce à la mise en place des programmes moteurs qui s'enrichiront au fil du temps, de recourir à la médiation verbale, de consulter un modèle des lettres ou de contrôler étroitement la trace. Cet accès à un mode de contrôle proactif des mouvements d'écriture, qui permet d'intégrer une série d'instructions, libère l'attention visuelle sollicitée par le contrôle des morphocinèses (Marcelli et al., 2013). Un *processus de composition* permet, en parallèle, d'augmenter la taille de l'unité impliquée dans la programmation graphomotrice en assemblant, selon un principe de *chunking*, des unités de connaissances élémentaires initialement mobilisées – la taille des traits atteignant vraisemblablement, avec la pratique, le format d'une lettre (Bara et Gentaz, 2010; Hulstijn et Van Galen, 1983; Kandel et al., 2019; Lambert et Espéret, 2002; Marcelli et al., 2013; Portier et al., 1990; Thibon et al., 2018a). Un *processus de procéduralisation*, qui consiste essentiellement à associer un but, une situation et une procédure, se met aussi en route. Les élèves transforment ce qu'ils comprennent et ce qu'ils parviennent à réaliser, d'abord par tâtonnement, en une méthode. Ils apprennent donc à reconnaître, pour un problème donné, les connaissances qui vont être utiles à sa résolution. Les règles de production utilisées fréquemment deviennent des automatismes, grâce à l'exercice répété et au développement des capacités générales. Les élèves peuvent alors mobiliser, avec un contrôle cognitif réduit, leurs connaissances procédurales. Les lettres sont ainsi tracées plus précisément et rapidement, chacune disposant d'un programme moteur stable pouvant être récupéré, tel un schéma de rappel, comme une action apprise sans tenir compte des conséquences sensorielles : « The improvement of motor control internalizes the sensory-motor links as learned actions³⁰ » (Thibon et al., 2018a, p. 201). Comme l'explique Alamargot (2007), cette automatisation des programmes moteurs libère une part des ressources de la mémoire de

³⁰ L'amélioration du contrôle moteur intériorise les liens sensori-moteurs comme actions apprises [traduction libre].

travail dédiées initialement « au maintien des représentations graphomotrices et au calcul de l'enchaînement des programmes moteurs » (p. 4).

La procéduralisation et l'automatisation des programmes moteurs favorisent le passage d'un traitement sériel de l'information à un traitement parallèle : puisque le geste est désormais guidé par une représentation interne de la forme des lettres et des mouvements correspondants, les processus orthographiques et/ou textuels peuvent être activés simultanément aux processus graphomoteurs (au même titre qu'un conducteur chevronné qui peut rester attentif à la circulation, à son environnement et aux conditions de la route, tout en changeant de vitesse et en maintenant une conversation, ou qu'un pianiste, qui peut lire une partition tout en synchronisant ses deux mains avec les pédales et en suivant le rythme, les nuances et le tempo de la pièce). À ce stade avancé, les performances sont rapides, habiles et précises, les mouvements s'effectuant de manière isochrone même quand l'individu n'est pas pleinement attentif à l'action (Halsband et Lange, 2006).

Grâce à l'expertise – et au développement des habiletés métacognitives – les élèves apprennent à adapter ou à ajuster, stratégiquement, des procédures déjà automatisées. Selon Masaki et Sommer (2012), le renforcement des représentations motrices en mémoire à long terme et l'application de ce qui a été appris dans de nouveaux contextes favorisent la généralisation ou le transfert, ce qui permet à l'individu de compenser, grâce à ses capacités d'adaptation grandissantes, les changements dans son environnement. Cette *phase de tuning* permet à l'écriture de se personnaliser et de s'assouplir, selon les contraintes spatio-temporelles de la tâche (e.g. accélérer la vitesse du tracé pour suivre le train de pensée). Cette optimisation du système de production, qui requiert une extension des capacités de la mémoire de travail pour que les scripteurs puissent répondre à des buts et des sous-buts de plus en plus complexes, entraîne une restructuration du réseau de connaissances; elle permet d'ailleurs, selon Bereiter et Scardamalia (1987), de passer d'une stratégie des connaissances rapportées à une stratégie des connaissances transformées.

La figure 5 que nous avons puisée des travaux de Palmis et al. (2017) résume bien, à la lumière des éléments que nous avons présentés jusqu'ici, le développement de la

graphomotricité de l'enfance à l'âge adulte pour un mot donné. Même si cela excède notre propos, ce schéma montre que les changements développementaux qui s'observent au cours de l'apprentissage sont accompagnés d'une réorganisation fonctionnelle et structurale du cerveau. Bien que ce schéma ne fasse pas explicitement référence aux stades de l'automatisation du modèle d'Anderson (1983), ces derniers peuvent témoigner des changements qui y sont illustrés du statut d'apprenti-scripteur à celui d'expert, en fonction de l'âge des élèves.

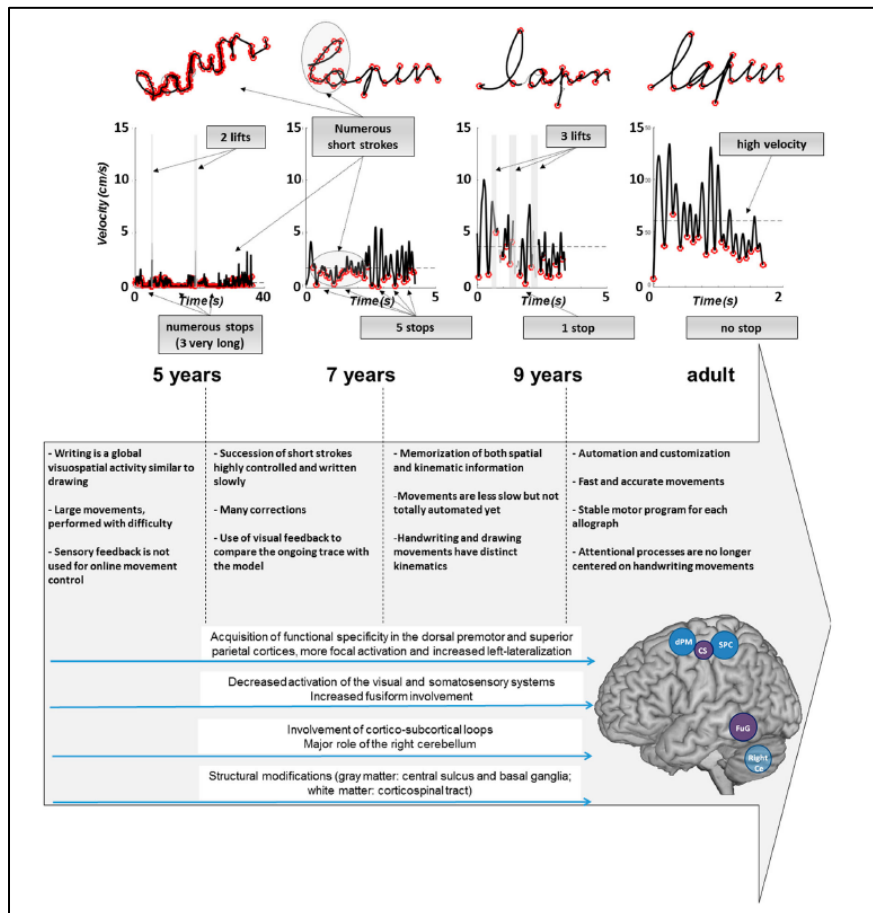


Figure 5 : Évolution de la graphomotricité de 5 ans à l'âge adulte (Palmis et al., 2017)

Les élèves de 7 ans, pour lesquels l'apprentissage de la graphomotricité est déjà bien entamé comparativement à ceux de 5 ans, pourraient donc être à la phase déclarative. Ils réguleraient l'écriture en recourant massivement aux réafférences visuelles. Celles-ci s'intégreraient graduellement aux informations proprioceptives issues du mouvement vers

l'âge de 9 ans. Cette phase de compilation serait liée à la mise en place des programmes moteurs qui deviendraient de plus en plus sophistiqués avec le temps. À partir de 9-10 ans, le geste graphomoteur, ne consommant plus autant de ressources cognitives, se procéduraliserait. Cette automatisation progressive laisserait place, vers 11 ans, à un mode de fonctionnement, associé à la phase de *tuning*, similaire à celui des adultes. Pour finir, rappelons que toutes ces phases ne seraient pas aussi figées dans le temps qu'il n'y paraît; les connaissances déclaratives et procédurales pourraient en effet, comme le suggèrent Kim et al. (2013), varier au sein d'une même tâche en fonction de sa difficulté.

Le tableau 1 qui suit fait la synthèse, en fonction de leur trajectoire développementale, des principaux stades du modèle d'Anderson (1983) appliqués, tel que nous le proposons ici, à l'apprentissage de la graphomotricité. Ces « phases temporelles » recoupent, dans une perspective plus large, celles de l'apprentissage moteur (Ferrel-Chapus et al., 2002; Guilbert et al., 2016, 2018b; Halsband et Lange, 2006; Masaki et Sommer, 2012). Elles reflètent chacune différents niveaux d'acquisition et de procéduralisation des programmes moteurs.

Tableau 1
Proposition du développement de la graphomotricité en trois « phases temporelles »

	Déclarative- interprétative	Compilation	<i>Tuning</i>
Âge	7 ans	9 ans	11 ans
Programmes moteurs	Non procéduralisés	En cours de procéduralisation	En cours d'automatisation
Mode de contrôle des mouvements	Rétroactif	± Proactif	Proactif
Vitesse de l'écriture	Lente	Accélérée	Rapide
Sollicitation de la mémoire de travail	Élevée	Réduite	Négligeable
Mode de gestion des traitements graphomoteurs et orthographiques	Sériel	± Parallèle	Parallèle
Erreurs de production	Importantes	Réduites	Rares
Phase d'apprentissage	Acquisition	Consolidation	Transfert

On peut donc constater, avec l'âge, un affranchissement progressif de la mémoire de travail dans la programmation et l'exécution graphomotrices : les scripteurs les plus expérimentés peuvent activer directement des connaissances et des procédures stockées en mémoire à long terme, ce qui permet aux ressources cognitives d'être allouées aux

traitements de plus haut niveau. Nous verrons à présent que l'acquisition de l'orthographe, comme celle de la graphomotricité, est également assujettie au développement de la mémoire de travail.

2. DÉVELOPPEMENT DE L'ORTHOGRAPHE LEXICALE

Les prochaines sections de ce chapitre décrivent sommairement les caractéristiques de la langue écrite française et de ses déterminants, permettant d'expliquer la plus ou moins grande facilité des élèves dans l'acquisition de l'orthographe lexicale et, conséquemment, la plus ou moins grande facilité des élèves en production écrite.

2.1 Opacité du système orthographique français

L'oral et l'écrit, sans être aux antipodes, diffèrent considérablement, appartenant tous deux à des registres distincts, qui ont des fonctions et des fonctionnements propres (Roch et François, 1999). Si l'expression orale, une activité d'abord sociale, semble plus naturelle et permissive, l'écrit se confond à la norme, au bon usage. L'apprentissage du langage écrit, en raison de sa complexité et des nombreuses connaissances spécifiques qu'il mobilise, est le fruit d'un long processus qui se poursuit jusqu'à l'âge adulte. Pour reprendre la métaphore esquissée par Adams (dans Lederer, 1987, p. 161), « good spellers need the eye of a hawk, the ear of a dog, and the memory of an elephant³¹ ».

L'orthographe idéale serait celle qui comporterait autant de phonèmes que de graphèmes (Fayol, 2013). Dans un tel système, dit transparent, à un phonème correspondrait un et un seul graphème, et inversement. Ainsi, « l'identification et la segmentation en phonèmes et graphèmes et la mémorisation des appariements suffiraient à assurer la lecture et l'écriture de n'importe quel mot, connu ou encore inconnu » (Fayol, Toczec-Capelle, de Labareyre et Caillaud, 2006, p. 76). Si certaines langues, comme l'italien, l'espagnol ou le finnois, s'approchent de cet idéal, en ayant une orthographe qui permet de prédire, à partir des connaissances du nom et du son des lettres, la prononciation de presque tous les mots ou

³¹ Les bons orthographes ont besoin de l'œil d'un faucon, de l'oreille d'un chien et de la mémoire d'un éléphant [traduction libre].

vice versa (Sprenger-Charolles, 2005), d'autres, comme le portugais, l'anglais ou le français, s'en écartent à différents degrés. Pour ces langues, les relations entre les phonèmes et les graphèmes sont peu prédictibles. Le français comporte, en guise d'exemple, plus de 130 graphèmes pour une trentaine de phonèmes, alors qu'en anglais, les 41 phonèmes peuvent s'écrire de 561 façons différentes (Fayol et Jaffré, 2008).

L'opacité du français complique l'apprentissage de la lecture (pensons au « ch » dans « écharde » et « orchidée »), mais aussi – et surtout – celui de l'orthographe : il faut en effet, pour orthographier correctement des mots réguliers comme « bateau », « landau » ou « domino », maîtriser la norme orthographique, c'est-à-dire être capable de sélectionner, pour le phonème [o], le graphème correct parmi trois des unités les plus fréquentes : « o », « au » et « eau » (Sprenger-Charolles et Casalis, 1996).

Si la seule application des règles de correspondance phonème-graphème ne permet d'orthographier sans fautes que la moitié des mots du lexique (Véronis, 1988), c'est, entre autres, en raison des nombreux mots de la langue française qui contiennent des lettres muettes, qui n'ont pas de contrepartie phonologique. Si la décision d'orthographier de telle ou telle manière un mot peut reposer sur des effets d'analogie (Bosse, Valdois et Tainturier, 2003; Martinet, Bosse, Valdois et Tainturier, 1999; Martinet, Valdois et Fayol, 2004) ou sur la fréquence d'apparition des lettres et des bigrammes, en fonction de leur position dans le mot (Cassar et Treiman, 1997; Pacton, Fayol et Perruchet, 2005; Pacton, Perruchet, Fayol et Cleeremans, 2001), l'étymologie et la morphologie peuvent aussi aider à lever l'ambiguïté. En tous les cas, le recours à la phonologie, bien qu'indispensable, demeure insuffisant, notamment en raison des marques inaudibles et du nombre important d'homophones, pour acquérir de bonnes connaissances lexicales (cf. Nootens, Doyen, Noyer-Martin et Simard-Dupuis, sous presse). Du fait de sa double base, à la fois phonographique et sémiographique (Fayol et Jaffré, 2008), l'apprentissage du système orthographique français, réputé complexe, nécessite la mise en œuvre de stratégies variées :

L'orthographe n'est pas un domaine de connaissance dans lequel une quelconque stratégie garantit la réussite. Ni le recours aux correspondances phonèmes-graphèmes, du fait de l'existence de

nombreux mots irréguliers, ni la récupération directe en mémoire, en raison de la fragilité des représentations orthographiques, n'assurent la réussite. La moins mauvaise des attitudes pour celui qui doit produire l'orthographe des mots consiste à disposer d'un éventail de procédures – la phonographie, le recours aux régularités orthographiques, la référence à des analogies lexicales, l'emploi de la morphologie et... le dictionnaire – et d'y faire appel de manière flexible en fonction des situations et des contraintes qu'elles imposent. (*Ibid.*, p. 152)

2.2 Relations entre la lecture et l'orthographe

Si l'oral et l'écrit diffèrent à bien des égards, les processus cognitifs et métacognitifs impliqués en lecture et en orthographe partagent, de leur côté, plusieurs similitudes (Berninger, 2000; Ehri, 1997; Fitzgerald et Shanahan, 2000). Selon Pérez (2013), elles sont les deux faces inséparables d'une même réalité, le recto et le verso du code écrit.

Ces deux activités, qui s'enrichissent mutuellement, exploitent toutes deux des compétences similaires : la conscience phonologique, qui correspond à la connaissance explicite que les mots du langage sont formés d'unités plus petites, les syllabes et les phonèmes, et la conscience phonémique, qui réfère à l'aptitude d'analyser ces phonèmes, de les manipuler et de les combiner, contribuent à l'acquisition du principe alphabétique (Roch et François, 1999). Ces compétences, parmi d'autres, jouent un rôle important en lecture et en orthographe; les compétences métaphonologiques précoces permettraient, par exemple, l'établissement de représentations orthographiques en mémoire (Ellis, 1997; Sprenger-Charolles, Bechennec et Lacert, 1998). La médiation phonologique, qui permet la lecture de mots nouveaux selon une procédure analytique, comme nous le décrirons dans la prochaine section, serait d'ailleurs une condition *sine qua non* de l'acquisition des connaissances orthographiques lexicales, agissant comme un mécanisme d'auto-apprentissage (Bowey et Muller, 2005; Cunningham, 2006; Cunningham, Perry, Stanovich et Share, 2002; Kyte et Johnson, 2006; Nation, Angell et Castles, 2007; Share, 1995, 1999, 2004).

Bien que la lecture et l'orthographe soient deux activités interdépendantes, tant dans les processus qu'elles mobilisent que dans leur acquisition, elles ne sont pas, pour reprendre les mots de Perfetti (1997), des « images en miroir » (p. 45). Elles présentent en effet des différences considérables, « comme l'attestent le fait qu'on puisse lire beaucoup de mots

sans savoir les orthographier correctement, ainsi que les dissociations observées en pathologie acquise » (Roch et François, 1999, p. 230). Comme nous l'avons vu à la section précédente, les règles de correspondance graphème-phonème sont plus régulières en français que les règles de correspondance phonème-graphème; cela explique, au moins partiellement, l'asymétrie souvent relevée dans les performances des élèves aux épreuves de lecture et d'orthographe (Ehri, 1997; Frith, 1985). L'éventail des possibilités en orthographe est en effet plus large, et le « choix de la bonne forme », plus étendu (Roch et François, 1999, p. 230). En outre, la production orthographique met en jeu le rappel, une activité plus exigeante sur le plan cognitif que la reconnaissance qui peut s'avérer suffisante pour lire (Alegria et Mousty, 1997). Pour transcrire correctement des mots, il faut disposer en mémoire de représentations orthographiques complètes, alors qu'il est possible de lire, entre autres grâce au contexte, avec des représentations partielles. En d'autres termes, lire « met en jeu une réponse : celle consistant à prononcer un mot. En revanche, orthographier met en jeu des réponses multiples : écrire plusieurs lettres selon une séquence correcte » (Ehri, 1997, p. 260).

2.3 Modèle à double voie en production écrite de mots

Selon plusieurs chercheurs, le traitement de la lecture et de l'orthographe peut être réalisé, par les experts, selon deux voies distinctes : a) la procédure phonologique ou sous-lexicale, dite d'assemblage, et b) la procédure lexicale, dite d'adressage (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon et Ziegler, 2001; Ellis, 1982; Kremin, 1999; Martinet et al., 1999; Sprenger-Charolles et Casalis, 1996).

2.3.1 Voie phonologique

La procédure phonologique est sollicitée en présence de mots inconnus, ou très rares, et de pseudo-mots. Elle nécessite le recours, en écriture, aux correspondances phonème-graphème pour produire, voire construire, une orthographe plausible. Cette voie se décompose en trois étapes : après une analyse acoustique et/ou visuelle, le mot est segmenté en phonèmes, ces phonèmes sont ensuite transcodés en graphèmes, en respectant les fréquences relatives d'association entre ces unités et les contraintes contextuelles qui les

régissent, et tous les différents graphèmes sont, *in fine*, assemblés et stockés temporairement dans le *buffer* graphémique (Fayol et Jaffré, 2008).

2.3.2 Voie lexicale

Pour sa part, la procédure lexicale est mobilisée en présence de mots connus, déjà encodés dans le lexique mental du scripteur, constitué principalement au cours de sa scolarité. Elle implique l'activation, rapidement et avec un faible coût cognitif, de la forme phonologique du mot suivie de l'accès à sa forme orthographique stockée en mémoire à long terme. Selon le modèle à double voie, le recours à la procédure lexicale est nécessaire pour orthographier correctement la plupart des mots de la langue, particulièrement ceux qui sont inconsistants (Kremin, 1999). Seule cette procédure permet, par exemple, d'orthographier sans fautes les mots « monsieur », « chaos » ou « tabac », pour lesquels la conversion des phonèmes en graphèmes conduit à des erreurs phonologiquement plausibles (i.e. erreurs de *régularisation*) mais néanmoins incorrectes, telles que « messieu », « cao » ou « taba » (Martinet et al., 1999).

2.3.3 Relative indépendance des voies

Des données recueillies auprès d'individus présentant des atteintes du système nerveux central montrent que les procédures phonologique et lexicale peuvent fonctionner de manière indépendante. En effet, certains adultes cérébrolésés sont en mesure d'orthographier correctement les mots réguliers et les pseudo-mots, alors que l'orthographe des mots irréguliers est compromise; dans ce cas, seule la voie lexicale semble atteinte. D'autres, au contraire, peuvent orthographier sans fautes des mots connus, réguliers ou irréguliers, mais ne peuvent plus générer une orthographe plausible lorsque des pseudo-mots leur sont dictés. Cela suggère plutôt, pour ces individus, une atteinte sélective de la voie phonologique (Ellis, 1982).

2.3.4 Convergence du produit des voies au niveau du buffer graphémique

Selon le modèle à double voie, tous les scripteurs experts, sans trouble neurologique, disposent de deux mécanismes pour orthographier l'ensemble des mots. Le modèle de

production écrite de mots proposé par Bonin, Méot, Lagarrigue et Roux (2015) illustre, comme le montre la figure 6, l'utilisation des procédures phonologique et lexicale lors a) de l'écriture de mots sous dictée, b) de la dénomination écrite à partir d'images, ou c) du rappel immédiat écrit de mots isolés.

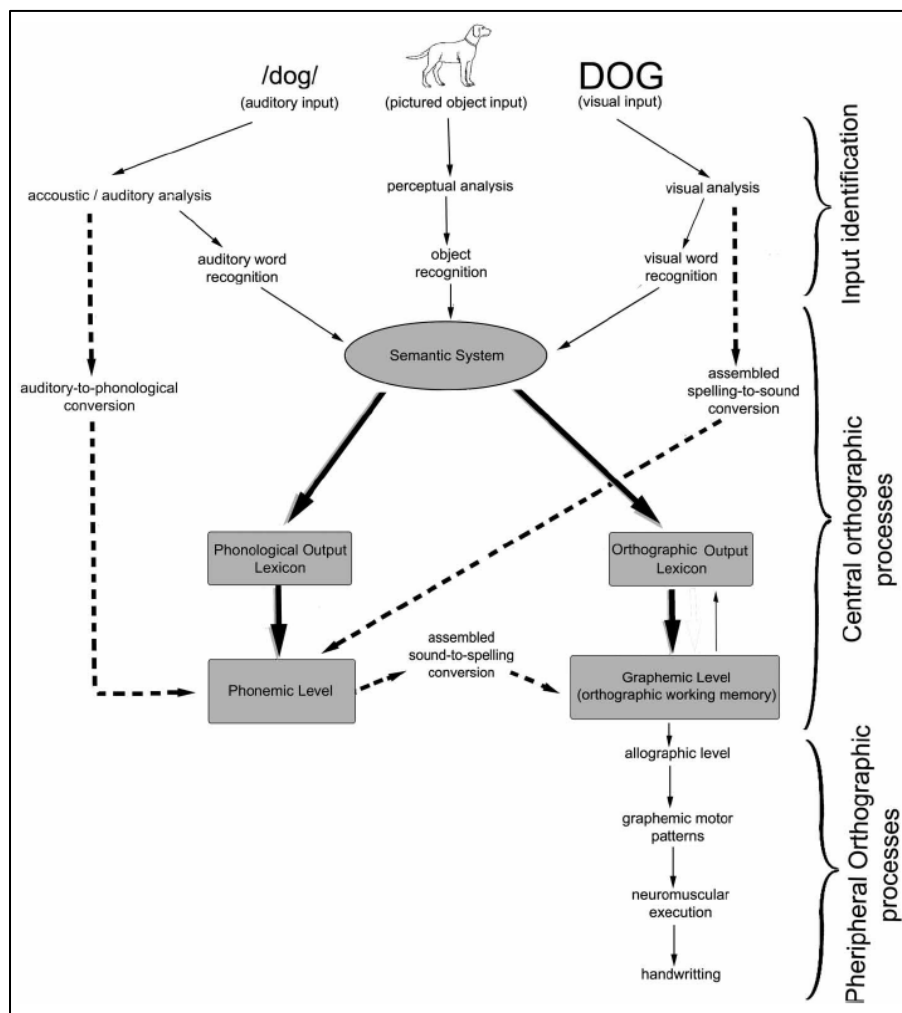


Figure 6 : Processus mobilisés lors de la production écrite de mots isolés (Bonin et al., 2015)

Selon ce modèle, élaboré pour les adultes, l'analyse visuelle d'un mot connu peut activer, pour une tâche de rappel immédiat (i.e. copie différée), sa reconnaissance. Cette activation, par une procédure lexicale, se transmet ensuite vers le système sémantique, une instance mémorielle dédiée au sens des mots. C'est à partir de ce registre que la représentation orthographique du mot est récupérée, au sein du lexique orthographique de

sortie. En présence d'un mot nouveau, l'item est segmenté, selon un traitement sous-lexical, en petites unités fonctionnelles : les différents graphèmes du mot sont donc transformés en phonèmes, et ces derniers sont ensuite reconvertis, à un niveau phonémique, en leurs unités orthographiques correspondantes. L'assemblage de ces unités permet la constitution d'une séquence abstraite de lettres, maintenue temporairement active dans le *buffer* graphémique.

Selon Rapp et al. (2002), les procédures phonologique et lexicale, pouvant être activées simultanément, se rejoignent dans le *buffer* graphémique, où elles peuvent entrer en compétition selon la consistance des mots à produire : « The higher difficulty in spelling high polygraphy would arise as a consequence of the fact that lexical and sublexical processes may derive conflicting responses when words have several plausible spellings. This conflict would increase the probability of errors and its resolution would increase spelling latencies³² » (*Ibid.*, p. 3). Selon toute vraisemblance, les informations en provenance de chacune des deux voies coïncident en présence d'un mot consistant : les représentations orthographiques sont donc congruentes, permettant à la production du mot d'être initialisée sans peine. Toutefois, en présence d'un mot inconsistant, voire peu fréquent, un conflit peut se produire et sa résolution amorcée pendant la latence peut se poursuivre au cours de la production écrite (Delattre, Bonin et Barry, 2006; Kandel, Lassus-Sangosse, Grosjacques et Perret, 2017; Lambert, Alamargot, Larocque et Caporossi, 2011; Maggio, Lété, Chenu, Jisa et Fayol, 2012; Roux, McKeeff, Grosjacques, Afonso et Kandel, 2013). Nous décrirons plus en profondeur, dans la prochaine section, cet « effet de cascade », qui fait référence au chevauchement des processus centraux et périphériques en cours d'écriture.

On constate donc que les deux voies sollicitées en production écrite de mots ne fonctionnent pas nécessairement en totale indépendance : la voie phonologique n'est pas forcément optionnelle ni restreinte à la production de mots nouveaux et de pseudo-mots,

³² La plus grande difficulté à orthographier des mots inconsistants, qui peuvent avoir plusieurs orthographes plausibles, proviendrait du fait que les voies phonologique et lexicale peuvent donner lieu à des réponses contradictoires. Ce conflit augmenterait la probabilité d'erreurs et sa résolution rallongerait les latences [traduction libre].

mais peut également intervenir, systématiquement, avec la voie lexicale – et donc de façon intégrée ou sommatoire.

Comme l'illustre le modèle de Bonin et al. (2015), le produit des deux voies aboutit, quelle que soit la tâche de production, dans une mémoire de travail spécifique au traitement orthographique, appelée *buffer* graphémique. Ce dernier pourrait représenter, en quelque sorte, un « écran interne sur lequel viendrait se projeter le mot » (Zesiger, 1995, p. 44). Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section portant sur le modèle de Van Galen (1991), cette mémoire transitoire est reconnue pour coder et traiter, d'une manière plus ou moins séquentielle, deux types d'informations : l'identité des graphèmes contenus dans le mot et leur ordre d'agencement. Un déficit au sein de cette instance peut donc entraîner une dégradation de l'encodage spatial de la séquence de graphèmes formant un mot, en provoquant des omissions, des substitutions, des ajouts ou des permutations de lettres, qui amènent à la production de mots phonologiquement non-plausibles (Afonso, Suarez-Coalla et Cuetos, 2015; Bonin, 2003; Caramazza et al., 1987). Ces erreurs, qui apparaissent le plus souvent au milieu ou à la fin du mot (Costa et al., 2011; Wing et Baddeley, 1980, 2009), ne peuvent pas être expliquées par des facteurs lexicaux et sous-lexicaux comme la fréquence d'usage ou la consistance orthographique, puisque ces derniers interviennent à des étapes antérieures de la production (Planton et Kandel, 2016). Leur probabilité est toutefois sensible à la longueur des mots : plus le nombre de lettres est important, plus la représentation graphémique du mot doit être maintenue longtemps en mémoire de travail, qui a une capacité limitée (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996). Les mots longs requièrent donc un traitement et/ou un maintien plus important, avant et pendant la réalisation du geste graphomoteur, que ceux qui sont courts (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza et al., 1987; Cossu, Gugliotta et Marshall, 1995; Costa et al., 2011; Gonzalez-Martin et al., 2017; Goodman et Caramazza, 1986; Planton et al., 2017).

Selon Bonin et al. (2015), la production écrite d'un mot sollicite les systèmes sémantique, phonologique et orthographique, mais aussi un système graphomoteur. Ce dernier concerne non pas la préparation du message, qui est plutôt laissée aux processus centraux de l'écriture, mais la programmation, la réalisation et le contrôle du geste

graphomoteur nécessaire pour tracer les lettres (Planton et Kandel, 2016). Rappelons ici que différents processus de nature périphérique interviennent, pour l'écriture manuscrite, en aval du niveau graphémique : a) celui de la représentation allographique, qui détermine les caractéristiques de chaque lettre au moment de la mise en place des mouvements d'écriture, b) celui de la sélection des programmes moteurs, qui codent la forme de la lettre, ainsi que la séquence, la direction et la taille des traits qui la composent, ainsi que c) ceux de paramétrisation et d'ajustement musculaire, qui impliquent le choix des effecteurs et qui modulent le déroulement spatio-temporel du geste (Ellis, 1988; Van Galen, 1991).

2.4 État de l'art sur le développement des compétences en orthographe et l'automatisation des correspondances phonème-graphème

L'apprentissage de l'orthographe lexicale, qui entrecoupe celui de la graphomotricité, est principalement caractérisé par le passage d'une stratégie phonologique à une stratégie orthographique, basée sur l'établissement d'une procédure d'adressage permettant aux scripteurs d'utiliser les informations visuo-spatiales des mots au lieu de ne s'attacher qu'à la seule sonorité – les élèves pouvant, en ayant mémorisé un nombre important de configurations, récupérer la forme orthographique d'un mot connu (cf. Pacton et Afonso Jaco, 2015; Treiman, 2017). Avec la pratique, la taille des unités déchiffrées et produites augmente : des bigrammes, des trigrammes, des syllabes ou des suites de lettres fréquemment rencontrés se voient ainsi traités, grâce à un processus de composition semblable à celui utilisé pour les unités graphomotrices, comme des *chunks* (Anderson, 1983). Ces associations plus complexes, permettant la constitution du lexique orthographique regroupant des connaissances déclaratives, allègent le coût cognitif (Lambert et Espéret, 2002). Le calcul de l'orthographe en temps réel, basé sur la médiation phonologique, laisse ainsi place à l'intégration et à la récupération des représentations lexicales stockées en mémoire à long terme (Alamargot, 2007). Un principe similaire s'applique pour la morphologie flexionnelle, qui permet de marquer le genre, le nombre, la personne et le temps des verbes, dont l'apprentissage dépend largement de l'application et de la procéduralisation de règles de production de type « condition-action » (Morin, 2004; Nunes, Bryant et Bindman, 1997; Totereau, Barrouillet et Fayol, 1998). Avec la pratique, les scripteurs doivent passer d'un calcul conscient de l'accord à la récupération d'instances mémorielles (Anderson, 1983;

Logan, 1988). Le développement de l'expertise en orthographe repose donc, pour la langue française, sur une automatisation des correspondances phonème-graphème – qui se fait au cours des deux premières années de scolarité – et des règles grammaticales, acquises graduellement au cours de l'apprentissage (Écalte et Magnan, 2015; Giasson, 2011; Morin et al., 2018).

3. GESTION EN TEMPS RÉEL DES TRAITEMENTS GRAPHOMOTEURS ET ORTHOGRAPHIQUES

Malgré l'importance de l'écriture manuscrite dans notre société, peu d'études se sont consacrées à la manière dont les scripteurs activent ou calculent l'orthographe des mots, et à la manière dont ils produisent les mouvements nécessaires pour former chacune des lettres qui les constituent (Lambert et Quémart, 2019). Comme il l'a été soulevé récemment (Planton, Jucla, Roux et Demonet, 2013; Planton et Kandel, 2016; Purcell, Turkeltaub, Eden et Rapp, 2011), les recherches en psychologie cognitive considèrent souvent les processus centraux et les processus périphériques de l'écriture séparément : « the links between spelling and graphomotor processes remain largely unknown in normally developing individuals³³ » (Lambert, Alamargot et Fayol, 2012, p. 353). Des études expérimentales ont pourtant mis en lumière, dans la dernière décennie, une interaction entre les traitements orthographiques et graphomoteurs chez des élèves d'âge primaire (Kandel et Perret, 2015; Suarez-Coalla, Gonzalez-Martin et Cuetos, 2018). Ainsi, la production des lettres ne dépend pas uniquement de leur forme, ni des aspects mécaniques associés à leur rappel, mais aussi des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots dont elles sont issues, et vice versa (Kandel et al., 2017). Les prochaines sections de ce chapitre abordent, dans cette perspective, la façon dont les traitements graphomoteurs et orthographiques sont gérés en temps réel par les scripteurs lors de la production écrite de mots isolés, en fonction des ressources cognitives qu'ils mobilisent.

³³ Les liens entre les processus orthographiques et graphomoteurs restent largement inconnus chez les individus à développement typique [traduction libre].

3.1 Traitements sériel et parallèle en production écrite de mots

La question du décours temporel, en production écrite de mots, des processus orthographiques et des processus graphomoteurs ne fait pas l'unanimité. Selon une conception sérielle du flux de l'information, les traitements orthographiques doivent être entièrement achevés avant le déclenchement, en aval, des traitements graphomoteurs (Damian et Stadhagen-Gonzalez, 2009). Dans cette perspective, les processus langagiers et ceux de planification et d'exécution motrices apparaissent modulaires, se succédant l'un après l'autre – et ne peuvent donc pas interagir entre eux. Selon une conception parallèle du décours des traitements, qui apparaît plus plausible chez les experts, les processus centraux et périphériques peuvent au contraire se chevaucher de manière flexible pendant l'écriture, afin de s'adapter aux différentes contraintes et de maintenir une certaine fluidité (Lambert et Quémart, 2019; Olive, 2014; Planton et al., 2017). Les traitements orthographiques qui ne sont pas encore achevés pendant la période de latence peuvent alors se poursuivre pendant la production écrite d'un mot, provoquant des pauses et/ou des variations dans la vitesse d'écriture³⁴.

Selon Fayol et Lété (2012), une procédure pas-à-pas est adoptée par les scripteurs lorsqu'ils ne possèdent pas les ressources cognitives nécessaires pour jongler avec l'ensemble des opérations impliquées en production écrite : « The cost of handwriting is so high and writing so slow in young children that it is only during pauses they are able to deal with other dimensions³⁵ » (p. 295). Moins un mot est coûteux à traiter sur le plan cognitif, plus il est probable qu'il puisse permettre l'activation de processus de haut niveau parallèlement à l'exécution graphomotrice (Lambert et al., 2011). La question est de

³⁴ En psychologie cognitive, les pauses et le ralentissement de l'écriture sont le reflet de l'activité processuelle des scripteurs (Foulin, 1995). Ils permettent d'inférer leur degré de surcharge cognitive et représentent plus que de simples moments de récupération (Alamargot, Chesnet et Caporossi, 2012). La distribution des pauses, en fonction de leur durée, de leur fréquence et de leur localisation, varie selon les caractéristiques des mots (Fayol, Foulin, Maggio et Lété, 2009); elle permet entre autres de repérer les sites critiques de traitement au cours de la production, et d'identifier les facteurs d'évolution des ressources cognitives mobilisées : « The longer the pause, the slower the writing rate, the heavier the load » (Fayol et Lété, 2012, p. 293) – plus la pause est longue, plus la vitesse d'écriture est lente, plus la charge en mémoire de travail est lourde [traduction libre].

³⁵ Le coût des traitements graphomoteurs est si élevé et l'écriture si lente chez les jeunes enfants que ce n'est que pendant les pauses qu'ils peuvent composer avec les autres dimensions du langage écrit [traduction libre].

déterminer ici si les novices peuvent activer, tout comme les experts, différents processus en parallèle, et à quel âge, dans quelle ampleur, dans quelles situations et sous quelles contraintes ils peuvent le faire.

3.2 Déterminants de la réussite et de la vitesse en production écrite de mots

D'après l'organisation hiérarchique du modèle de Van Galen (1991), les processus orthographiques régulent le déroulement temporel du geste graphomoteur. Selon plusieurs études, différentes unités sous-lexicales, comme les syllabes (cf. Sausset, Lambert et Olive, 2016), les morphèmes dérivationnels (Kandel, Alvarez et Vallée, 2008), les doubles consonnes (Kandel et al., 2019; Kandel, Peereman et Ghimenton, 2013, 2014), les graphèmes complexes (Kandel et Spinelli, 2010), les bigrammes (Kandel, Peereman, Grosjacques et Fayol, 2011) et les trigrammes (Zesiger, Mounoud et Hauert, 1993) peuvent en effet affecter les mouvements d'écriture.

D'autres études ont approfondi cette notion de cascade en examinant, auprès d'adultes et d'enfants, à quel moment et comment les processus centraux et les processus périphériques interagissent pendant l'écriture. La présente section dresse un panorama des principaux facteurs qui influencent, lors de la production écrite de mots, a) la latence, qui est associée typiquement à la récupération des représentations orthographiques en mémoire, aux mécanismes de conversion phonème-graphème et/ou au rappel des programmes moteurs lorsqu'ils sont disponibles, b) la durée de production, qui renvoie au mouvement, dépendant des contraintes et des exigences de la tâche, résultant de ces traitements, et c) le pourcentage de mots erronés ou, à l'inverse, de mots bien orthographiés (Afonso, Alvarez et Kandel, 2015; Kandel et Perret, 2015).

3.2.1 Effet de la régularité ou de la consistance des mots

Dans une étude menée auprès d'adultes, Delattre et al. (2006) ont montré que la période de latence et la durée de production étaient plus longues pour les mots irréguliers³⁶

³⁶ La régularité et la consistance sont souvent confondues dans les travaux portant sur la production orthographique (Bonin, Collay et Fayol, 2008). Pour cette raison, ces termes sont utilisés, dans la présente

que pour les mots réguliers dans une tâche de dictée. Selon ces chercheurs, ces résultats confirment, conformément au modèle de Van Galen (1991) et à celui de Rapp et al. (2002), que la gestion orthographique peut se dérouler parallèlement à l'exécution graphomotrice, le traitement du conflit au niveau central entre les voies lexicale et phonologique, qui se manifeste en présence de mots irréguliers, n'étant pas encore achevé au moment de leur production. Des tels résultats ont aussi été observés par Bloemsaat, Van Galen et Meulenbroek (2003) en dactylographie.

Dans une tâche de copie, Roux et al. (2013) ont montré, chez des adultes, que la durée moyenne de traçage des traits composant chaque lettre était prolongée par la présence d'une irrégularité dans le mot, en fonction de sa position : lorsque cette irrégularité était placée en début de mot (e.g. « monsieur »), seule la durée de production des premières lettres était affectée; en revanche, lorsque l'irrégularité était placée en fin de mot (e.g. « instinct »), la durée de production de l'ensemble des lettres était prolongée : « Orthographic irregularity in word initial is processed on-line during the production of the first letters, whereas the processing of final irregularity is distributed over the entire word³⁷ » (*Ibid.*, p. 240). Ces résultats ont été répliqués récemment par Planton et al. (2017) et Palmis et al. (2019) dans une tâche de dictée, en montrant qu'une irrégularité placée en début de mot rallongeait la latence chez des adultes, alors qu'une irrégularité placée en fin de mot affectait plutôt le décours temporel de l'écriture, en diminuant la vitesse de tracé.

Pour évaluer la gestion des processus orthographiques et graphomoteurs dans une situation plus écologique, Lambert et al. (2011) ont utilisé une tâche de copie de mots successifs. Ils ont montré, chez des adultes, que la production des mots irréguliers entraînait plus de levers de regard que celle des mots réguliers. Selon ces chercheurs, les processus centraux et périphériques activés lors de la copie d'une série d'items peuvent se chevaucher lorsque les contraintes orthographiques sont relativement faibles. Ainsi, en présence de mots réguliers, un phénomène d'anticipation se produit : ces items sont copiés de manière assez

section, de manière interchangeable. Ils font tous les deux référence au caractère polygraphique de l'orthographe (i.e. le degré de transparence plus ou moins élevé des correspondances phonème-graphème).

³⁷ L'irrégularité placée en début de mot est traitée pendant la production des premières lettres, alors que le traitement de l'irrégularité placée en fin de mot est réparti sur l'ensemble des lettres [traduction libre].

fluide pendant que les scripteurs consultent le modèle pour identifier le prochain mot à écrire. Toutefois, en présence de mots complexes, plus difficiles à traiter, l'analyse visuo-orthographique ne peut, avec la même ampleur, prendre place en parallèle avec l'exécution graphomotrice; ces deux processus sont donc interrompus, provoquant un arrêt ou une pause en cours d'écriture pour permettre à la représentation orthographique d'être réitérée en mémoire : « For [those] words, it is impossible to manage the spelling and graphomotor processes in parallel. The activity therefore has to be segmented and the graphomotor program suspended, so that the word's spelling representation can be reactivated by looking back at the model³⁸ » (*Ibid.*, p. 147).

Dans une tâche de copie, Afonso et al. (2015) ont montré tout récemment auprès d'adultes que la durée de production des lettres dans un mot dépendait, outre de sa régularité, de la consistance moyenne des associations graphème-phonème (basée sur le nombre d'occurrences dans la langue, pour un graphème donné, de chacune des différentes formes phonologiques correspondantes). Ces chercheurs ont montré, indépendamment de la frontière syllabique, que la durée de production du graphème-cible « e » était plus élevée, tout comme la durée de production de la lettre qui le précédait ou le suivait, dans des mots complexes à prononcer (e.g. « bedaine ») que dans des mots simples (e.g. « berceau »). Dans une autre étude menée auprès d'adultes, ces chercheurs ont montré que la période de latence, la durée de l'intervalle entre chaque lettre et la durée de production globale des mots étaient plus longues pour les items irréguliers que pour les items réguliers, plus encore dans une tâche de dictée que dans une tâche de copie. Ils ont aussi montré que le pourcentage de mots bien orthographiés était plus faible dans ces deux conditions. Ces résultats montrent, comme ceux des études précédentes, que la réussite et le décours temporel des traitements orthographiques chez des adultes sont influencés par la voie sous-lexicale. Ils montrent également, à l'instar de Bonin et al. (2015), que le déroulement du mouvement est dépendant

³⁸ Pour ces mots, il est impossible de gérer les processus orthographiques et graphomoteurs en parallèle. La production écrite doit donc être segmentée et l'exécution graphomotrice suspendue, afin de réactiver la représentation orthographique du mot en consultant à nouveau le modèle à copier [traduction libre].

de la nature de la tâche, la production des lettres semblant plus difficile quand le mot est dicté à l'oral que lorsqu'il est présenté visuellement.

Les études présentées jusqu'à présent montrent que les performances des adultes en production orthographique, évaluées en termes de vitesse et/ou de précision, sont moins bonnes pour les mots inconsistants/irréguliers que pour les mots consistants/réguliers, tant dans une tâche de dictée de mots, de copie de mots ou de dénomination écrite à partir d'images. D'autres études, conduites auprès d'enfants, arrivent aux mêmes conclusions.

Kandel et Valdois (2005) ont montré, auprès de 44 élèves français âgés de 6 à 8 ans, que la durée moyenne de traçage des traits composant un mot dans une tâche de copie était plus élevée pour les mots irréguliers que pour les mots réguliers. Le traitement des mots se montre dépendant de leur régularité, mais aussi de leur âge d'acquisition. Selon ces chercheurs, les mots irréguliers qui sont acquis tôt dans le cursus scolaire sont déjà stockés dans le lexique mental des élèves, leurs représentations orthographiques étant donc facilement accessibles. Les représentations orthographiques sont toutefois susceptibles d'être indisponibles ou sous-spécifiées en présence de mots non familiers. Kandel et Perret (2015) ont à leur tour étudié, dans une tâche de copie de mots, la coordination des processus orthographiques et graphomoteurs chez 64 élèves français de 8 à 10 ans. Leur étude révèle que la période de latence des mots irréguliers ainsi que leur durée de production globale sont plus grandes que celles des mots réguliers. En outre, les résultats obtenus montrent que la fluidité du geste graphomoteur est meilleure lors de la production des mots réguliers que lors de celle des mots irréguliers. Ces chercheurs ont aussi montré, avec une analyse par lettre complémentaire, que la durée de production et la dysfluence étaient plus élevées en début qu'en fin de mot, indépendamment de leurs caractéristiques sous-lexicales et de l'âge des élèves :

This is likely due to the gradual decrease of the cognitive resources that are required to keep the orthographic representation active while producing other letters. Nevertheless, the fluctuation was more important for the 8-year-olds than the older children. The younger children also had

to deal with the cognitive load imposed by graphomotor control because their writing was still not completely automatic³⁹. (*Ibid.*, p. 333)

Plus récemment encore, Suarez-Coalla et al. (2018) ont montré, auprès de 75 élèves espagnols âgés de 7 à 9 ans, que l'écriture de mots irréguliers rallongeait la période de latence contrairement à celle de mots réguliers, mais uniquement dans une tâche de dictée comparativement à une tâche de copie. Ces chercheurs ont également montré que la durée de production de la première lettre des mots était plus importante en présence d'une irrégularité, mais uniquement pour les élèves de 7 ans dans la tâche de dictée. Ces résultats laissent penser, pour une langue transparente à tout le moins, que l'effet de cascade est susceptible d'être modulé par l'âge des élèves – ou éventuellement par leur niveau d'habiletés graphomotrices – et par les tâches qui leur sont proposées.

Au niveau développemental, l'ensemble des résultats témoigne d'une évolution des paramètres spatio-temporels de l'écriture avec l'âge : la latence et la durée de production diminuent au cours de la scolarité, particulièrement entre 8 et 9 ans, alors que la fluence de production augmente pendant la même période. Les représentations orthographiques deviennent donc plus stables avec la pratique, et les mouvements plus automatisés en raison de la maturation motrice. D'autres chercheurs ont montré, en étudiant la production de mots des jeunes scripteurs d'un point de vue qualitatif, et non quantitatif, que la régularité était aussi l'un des facteurs prédictifs de la réussite en orthographe pour les élèves d'âge primaire (Lété, Peereman et Fayol, 2008; Sovik, Arntzen, Samuelstuen et Heggberget, 1994; Sovik, Samuelstuen, Svarva et Lie, 1996).

Tous les résultats de recherche que nous avons présentés dans cette section, aussi bien pour les adultes que pour les enfants, s'accordent avec l'hypothèse selon laquelle l'effet de consistance ou de régularité observé sur la réussite et/ou le décours temporel des traitements orthographiques est imputable à l'intervention de la voie sous-lexicale pour recomposer l'information. D'autres recherches, ayant étudié l'impact du statut lexical ou de la fréquence

³⁹ Cela est probablement dû à la diminution progressive des ressources cognitives nécessaires pour maintenir la représentation orthographique active tout en produisant les lettres. Néanmoins, la fluctuation était plus importante pour les élèves de 8 ans que pour les élèves plus âgés, en raison du coût cognitif requis par les traitements graphomoteurs qui ne sont pas encore automatisés à cet âge [traduction libre].

d'usage, comme nous l'aborderons dans les prochaines sections, montrent que la voie lexicale a elle aussi une influence sur le temps de préparation et d'exécution des mots.

3.2.2 Effet de la lexicalité

Dans une tâche de copie, Roux et al. (2013) ont montré, comme Hulstijn et Van Galen (1983), que l'écriture de pseudo-mots chez des adultes était non seulement initiée plus tardivement que celle de mots réguliers, mais qu'elle prenait aussi plus de temps. Dans une tâche de rappel immédiat, dans laquelle les participants devaient écrire à trois reprises chaque item, Lambert, Kandel, Fayol et Espéret (2008) ont montré que la période de latence initiale, qui réfère au temps écoulé entre la présentation visuelle de l'item sur l'écran et la première pression exercée sur la pointe du stylo, était plus longue pour les pseudo-mots que pour les mots. Similairement, Kandel et al. (2017) ont montré, auprès de 17 élèves français à développement typique (10.7 ans) et 17 autres élèves en trouble du langage écrit (11.5 ans), que les pseudo-mots entraînaient une latence plus importante que les mots dans une tâche de copie; la durée de mouvement et la dysfluente étaient également plus grandes pour les pseudo-mots que pour les mots, mais uniquement chez les élèves dyslexiques qui présentaient un déficit de la voie phonologique. Ces résultats suggèrent que les pseudo-mots, qui nécessitent le recours à la médiation phonologique, demandent plus de ressources cognitives pour être traités que les mots, dont l'orthographe peut être récupérée directement en mémoire à long terme. Cet effet de la lexicalité n'est que la limite extrême de la fréquence, comme nous le verrons dans les prochaines lignes, les pseudo-mots n'ayant aucune adresse dans le lexique mental des scripteurs, vu qu'ils n'existent pas.

3.2.3 Effet de la fréquence des mots

Dans leur étude, Lambert et al. (2008) ont montré, en plus de l'effet du statut lexical, que la période de latence des mots fréquents, dont l'orthographe peut être convoquée directement dans le lexique mental, était plus courte que celle des mots non-fréquents. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus plus récemment dans d'autres études, et supposent que l'effet de la fréquence, qui s'observe quelle que soit la tâche de production, n'affecte pas les mouvements de l'écriture, mais plutôt le temps de préparation des mots et/ou leur réussite

orthographique (Afonso et al., 2015; Bonin et al., 2015; Bonin, Laroche et Perret, 2016; Lambert et al., 2011). Dans cette perspective, Delattre et al. (2006) ont montré, dans une tâche de dictée, que la fréquence des mots affectait bien la période de latence, mais qu'elle n'avait en contrepartie aucun impact, contrairement à la régularité, sur la durée de production : « This may suggest that it is only the unresolved conflict concerning the spelling of irregular words that cascades to affect writing execution; variables that simply affect the ease of retrieving a spelling, such as frequency, appear not to cascade in the same fashion⁴⁰ » (*Ibid.*, p. 1337). Ces chercheurs ont aussi mis en évidence, comme Lambert et al. (2011), une interaction positive entre les facteurs fréquence et régularité pour le temps de latence et le nombre d'erreurs en orthographe, l'effet de régularité étant plus fort pour les mots non-fréquents, et inversement.

Chez les enfants, les conclusions ne sont pas aussi fermement établies. En langue espagnole, Suarez-Coalla et al. (2018) ont montré que l'effet de fréquence se limitait, comme c'est le cas chez les adultes, à la période de latence – n'ayant aucun impact, chez les élèves de 7 à 9 ans, sur la durée de production de la première lettre des mots. En revanche, d'autres recherches menées ces dernières années auprès d'élèves du primaire ont montré que la fréquence des mots influençait également, en plus de la latence, la performance à l'écrit et le décours temporel des traitements orthographiques en entraînant un pourcentage de mots erronés et une durée de production plus élevés pour les mots non-fréquents que pour les mots fréquents (Afonso et al., 2017; Gonzalez-Martin et al., 2017; Kandel et al., 2017; Kandel et Perret, 2015; Lété et al., 2008; Maggio et al., 2012; Sovik et al., 1994, 1996). Dans cette perspective, Sovik et al. (1996) ont montré un effet de la fréquence sur la durée de production globale des mots chez 19 élèves néerlandais de 9 ans; ils ont aussi montré que l'ampleur de cet effet dépendait de la longueur des mots à produire ou de leur régularité. Autrement dit, l'effet de fréquence augmentait significativement en fonction du nombre de lettres contenues dans le mot ou de sa complexité sur le plan orthographique.

⁴⁰ Ces résultats suggèrent que seul le conflit non résolu concernant l'orthographe des mots irréguliers peut influencer sur l'exécution graphomotrice; les variables qui affectent simplement la facilité à recouvrer les représentations orthographiques en mémoire à long terme, comme la fréquence lexicale, ne semblent pas *cascader* de la même manière [traduction libre].

Selon Afonso et al. (2017), les caractéristiques lexicales d'un mot cessent d'affecter le déroulement des mouvements périphériques de l'écriture lorsque les processus graphomoteurs deviennent, avec l'expertise, relativement indépendants des autres composantes de l'écriture, notamment de l'orthographe. Ces chercheurs ont montré, dans une tâche de copie proposée à 60 élèves espagnols âgés de 7, 9 et 11 ans, que le temps de latence était plus élevé pour les mots non-fréquents que pour les mots fréquents, indépendamment de l'âge des élèves. La durée de production des deux premières lettres du mot était aussi plus élevée pour les mots non-fréquents, mais uniquement pour les élèves de 7 ans chez lesquels les programmes moteurs ne sont pas encore procéduralisés.

Nous pouvons constater que les représentations orthographiques des mots non-fréquents, qui ne sont pas stabilisées en mémoire à long terme, prennent plus de temps à convoquer, calculer et/ou transcrire que celles des mots fréquents. Chez les adultes, l'effet de fréquence semble se limiter uniquement au temps de préparation des mots, les processus centraux étant gérés et entièrement résolus pendant la latence; chez les enfants toutefois, et en particulier pour ceux en début d'acquisition, cet effet peut se poursuivre pendant la production d'un mot et, en entrant en interaction avec les processus graphomoteurs, en affecter le déroulement.

3.2.4 Effet de la longueur des mots

Comme le mettent en lumière les dernières sections, la production écrite de mots isolés se fait sous l'influence des procédures phonologique et lexicale, le geste graphomoteur étant dépendant en partie de la régularité, du statut lexical ou de la fréquence des mots. D'autres études, moins nombreuses, montrent que le *buffer* graphémique, une mémoire de travail par définition temporaire et sensible aux interférences, influence également les performances orthographiques (Rapp et Dufor, 2011). Comme nous le verrons dans cette section, la longueur d'un mot, exprimée en nombre de lettres, peut affecter considérablement les capacités de stockage et de traitement.

Une augmentation du nombre de lettres à écrire, qui peut influencer chez les experts le degré de planification motrice, devrait se manifester par une augmentation linéaire du

temps de traitement (Hulstijn et Van Galen, 1983; Planton, 2014; Van der Plaats et Van Galen, 1990) – du moins d’un point de vue strictement sériel (Planton et al., 2017). Une étude menée par Bonin et al. (2015) auprès d’adultes montre, dans cette perspective, une corrélation positive entre le nombre de lettres contenues dans un mot et le laps de temps qui s’écoule avant sa production dans une tâche de rappel immédiat. La latence serait donc consacrée aux étapes centrales du traitement, mais aussi à la sélection et à l’activation des programmes moteurs, quand ils sont disponibles en mémoire à long terme, d’une série de lettres ou du mot entier. Cette capacité d’anticipation se montrerait dépendante du niveau de compétences motrices des scripteurs, émergeant vers l’âge de 9 ou 11 ans pour les mouvements d’écriture (Kandel et Perret, 2014; Louis-Dam et al., 2000; Orliaguet, Kandel et Boe, 1997). Comme nous l’avons déjà souligné, aucune étude, à notre connaissance, ne précise quel est l’empan de la programmation graphomotrice ni sous quelles contraintes cet empan est susceptible de se modifier. Même si les lettres peuvent être groupées en *chunks* chez les experts pour faciliter la programmation graphomotrice (Fayol et Lété, 2012; Kandel et al., 2019) et en réduire le coût cognitif (Anderson, 1983), nous ne savons pas, à l’heure actuelle, combien de lettres peuvent être véritablement programmées, en fonction de l’expertise des scripteurs, avant l’initiation du geste⁴¹.

L’effet de la longueur des mots, qui a été analysé à maintes reprises en neuropsychologie (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza et al., 1987; Costa et al., 2011; Goodman et Caramazza, 1986), a rarement été étudié auprès de scripteurs à développement typique, et encore moins auprès d’enfants (Bonin, 2003).

Une étude menée par Hulstijn et Van Galen (1983) auprès d’adultes montre que la longueur d’une séquence de chiffres affecte uniquement la période de latence lorsqu’aucune contrainte n’est imposée aux scripteurs; or, quand ces derniers ont pour consigne de produire

⁴¹ Certaines études montrent que la programmation motrice des mots est dépendante de leur structure syllabique, quelle que soit la nature ou la longueur de ces mots. La durée de production des lettres serait systématiquement plus longue à la frontière syllabique (e.g. entre les lettres « r » et « b » dans « charbon »), indépendamment du niveau d’expertise (Kandel, Alvarez et Vallée, 2006). Ces données suggèrent que le geste pour produire la première syllabe est programmé pendant la période de latence, alors que la programmation motrice de la syllabe suivante se fait en cours de production, en même temps que la paramétrisation des traits locaux (cf. Sausset et al., 2016).

les chiffres dans un sens non conventionnel, la longueur de la séquence rallonge également le temps de production et la durée de l'intervalle entre deux chiffres. Même si cette étude a été conduite auprès d'experts, elle suggère que la programmation graphomotrice d'unités qui ne sont pas familières, ou suffisamment maîtrisées, peut empêcher le traitement en parallèle des informations.

Ces résultats peuvent être rapprochés d'une étude espagnole d'Afonso et al. (2015) menée auprès d'adultes normaux et en trouble du langage écrit. Ces chercheurs ont montré que la copie et l'écriture sous dictée de mots longs augmentaient la latence, la durée de l'intervalle entre deux lettres et la durée de production totale davantage que celles de mots courts, l'effet de la longueur des mots étant plus particulièrement prononcé pour les dyslexiques⁴². Ainsi, le nombre de lettres peut affecter la préparation des mots, mais aussi leur production. Cet effet est vraisemblablement provoqué par les coûts de maintien et de traitement supplémentaires en mémoire de travail. Les résultats de cette étude doivent toutefois être interprétés prudemment. Les participants devaient en effet écrire les mots en lettres majuscules, avec un crayon sans encre, ce qui pourrait avoir induit un coût cognitif additionnel sur le plan graphomoteur.

Ces deux études menées auprès d'adultes suggèrent que la longueur d'une séquence de lettres ou de chiffres peut perturber la mise en œuvre de traitements parallèles à la réalisation du tracé dans des conditions inhabituelles de production qui inhibent sans doute, en raison de leur complexité, les automatismes graphomoteurs acquis au fil des années de pratique.

Nous savons que les élèves produisent les mots trait par trait en début d'acquisition, avant de passer avec l'âge à une unité ou à des unités plus larges (Bara et Gentaz, 2010; Humblot et al., 1994; Lambert et Espéret, 2002; Thibon et al., 2018a). Les novices activent

⁴² La dyslexie s'accompagne souvent de difficultés graphomotrices (Alamargot et al., 2014; Alamargot, Morin et Simard-Dupuis, sous presse; Brun-Henin, Velay, Beecham et Cariou, 2012; Jover, Ducrot, Huau, Bellocchi, Brun-Henin et Mancini, 2013; Pagliarini et al., 2015), ce qui pourrait avoir accentué l'effet de la longueur des mots chez ces participants. Le coût cognitif imposé par la composante graphomotrice pourrait en effet s'ajouter, chez ceux qui présentent un déficit dans la programmation et/ou dans l'exécution graphomotrice(s), au coût déjà élevé suscité par la médiation phonologique, venant surcharger la mémoire de travail.

donc, une fois les procédures lexicale et sous-lexicale achevées, les schèmes moteurs les uns après les autres, contrairement à ce que font les experts : « The child will activate the motor program to produce the following letter once he has finished writing the previous one. This happens because the cognitive, motor and attentional load to write each letter is extremely high. With practice, he will be able to build more complex letter sequences⁴³ » (Kandel et Perret, 2014, p. 6). Ainsi, le nombre de lettres à écrire devrait également affecter, pour les novices, la durée de production des mots. La sélection, la planification et le contrôle des lettres doivent en effet être accomplis, pour les jeunes scripteurs, au pas-à-pas, ne pouvant être anticipés entièrement en amont. Dans cette perspective, Sovik et al. (1994, 1996) ont comparé, chez des élèves de 9 ans, l'écriture sous dictée de mots courts, comportant de 3 à 5 lettres, à celle de mots longs, en contenant entre 6 et 9. Ces chercheurs ont montré que la longueur, qui n'avait aucun impact sur le temps de latence, influençait négativement la durée de production des mots et le nombre d'erreurs orthographiques.

Une augmentation du nombre de lettres à maintenir dans le *buffer* graphémique peut donc avoir un impact sur le délai de déclenchement de l'écriture et/ou sur la durée de production des mots, mais aussi sur leur taux de réussite orthographique (Bonin et al., 2015; Cossu et al., 1995; Gonzalez-Martin et al., 2017; Lété et al., 2008; Sovik et al., 1994, 1996). En effet, le coût cognitif requis par le maintien des représentations graphémiques, qui est plus important pour un mot long que pour un mot court, pourrait entraîner chez certains scripteurs une (sur)charge cognitive, se manifestant par une augmentation du nombre d'erreurs orthographiques en présence de mots longs. Dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), cet effet devrait être d'autant plus important que le coût cognitif des traitements graphomoteurs est lui-même élevé.

⁴³ L'enfant activera le programme moteur pour produire la lettre suivante une fois qu'il aura fini d'écrire la précédente. Cela se produit parce que la charge cognitive, motrice et attentionnelle nécessaire pour écrire chaque lettre est extrêmement élevée. Avec la pratique, il sera capable de construire des séquences de lettres plus complexes [traduction libre].

3.3 Une intégration des représentations graphomotrices et orthographiques au sein d'un même *chunk*?

Les études que nous avons présentées dans ce chapitre montrent que la dissociation entre l'orthographe et le geste n'est pas entièrement fonctionnelle (Longcamp et al., 2014; Rodriguez et Villarroel, 2016).

En début d'acquisition, les traitements mis en œuvre par les scripteurs sont segmentés dans le temps, en raison d'un coût cognitif important en mémoire de travail, ce qui réduit leur efficacité. Le coût cognitif dévolu au calcul de l'orthographe, au maintien des représentations graphémiques, à la convocation des allographes nécessaires pour les écrire et à la gestion locale du tracé, dépendante des informations sensorielles, est vraisemblablement trop élevé. Dans ce cas, les scripteurs ne peuvent pas convoquer directement les connaissances encodées en mémoire à long terme, car le nombre de procédures à mettre en œuvre pour réaliser la tâche est trop important, la quantité d'activation excédant, autrement dit, la capacité totale du système. Cette forte mobilisation des connaissances déclaratives induit donc une rupture des processus, afin d'éviter que les scripteurs peu aguerris ne soient débordés par le cumul des tâches à gérer (Fayol et Miret, 2005). Cette gestion sérielle s'oppose à une gestion parallèle des différentes composantes impliquées lors de la production écrite d'un mot, rendue possible par une procéduralisation des connaissances et une encapsulation des traitements, qui permettent de surmonter toutes deux les limites capacitaires (Alamargot, 2007).

La mise en place, la procéduralisation et l'automatisation graduelles des programmes moteurs et des correspondances phonème-graphème permettent donc, avec l'expertise, de réduire le coût cognitif de la production écrite. Selon notre interprétation du modèle d'Anderson (1983), le développement de l'expertise en production écrite pourrait se faire grâce à une intégration des représentations graphomotrices, phonologiques et orthographiques au sein d'un même système procédural (i.e. d'un même *chunk*), qui deviendrait de plus en plus affiné avec l'âge et la pratique (Pérez, Giraudo et Tricot, 2012). Ce renforcement mutuel pourrait dépendre des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots, certaines configurations pouvant être compilées, ainsi que le suggèrent Wagner et al. (2011), plus tôt que d'autres :

As a result of considerable writing experience over years, the perceptual and motor aspects of handwriting [could] become associated and even integrated with language networks, much as graphemes and letter strings become attached to corresponding phonemes and morphemes. As a result, relations between handwriting and higher-level aspects of writing and language more generally might actually be bidirectional: handwriting influences higher level writing directly or as a mediator, but also is a by-product of the development of higher levels aspects of writing and language⁴⁴. (*Ibid.*, p. 217)

4. VERS L'EXPÉRIMENTATION

Nous savons que le geste graphomoteur se développe graduellement au cours de la scolarité grâce au passage d'un mode de contrôle rétroactif, basé sur les informations sensorielles, à un mode de contrôle proactif, basé sur une représentation interne – tant visuelle que motrice – de la forme des lettres et des mouvements nécessaires pour les écrire (Chartrel et Vinter, 2004, 2006; Zesiger, 1995). La mise en place de ces programmes moteurs est nécessaire pour accélérer la vitesse d'écriture, en soulageant peu à peu le coût cognitif requis par le calcul en temps réel des trajectoires et l'enchaînement des lettres dans les mots.

En prenant appui sur le modèle ACT d'Anderson (1983) et sur les études empiriques présentées dans le contexte théorique, nous proposons dans le cadre de cette thèse de formaliser le développement de la graphomotricité en trois temps (cf. Tableau 1) : a) la phase déclarative-interprétative (± 7 ans), où les lettres sont produites trait par trait ou localement, en recourant massivement au feedback visuel, b) la phase de compilation (± 9 ans), où les informations proprioceptives issues du mouvement s'intègrent peu à peu aux réafférences visuelles, grâce à la mise en place des programmes moteurs, ce qui permet de réduire le coût cognitif sollicité par le contrôle des morphocinèses, et c) la phase de *tuning* (± 11 ans), où les lettres, qui ne sont plus aussi consciemment contrôlées, sont désormais programmées en un

⁴⁴ Grâce à la pratique répétée de l'écriture, les représentations visuelle et motrice des lettres pourraient être associées et même intégrées à des réseaux linguistiques, tout comme les graphèmes et les chaînes de lettres qui se lient aux phonèmes et aux morphèmes correspondants. En conséquence, les relations entre les processus centraux et les processus périphériques de l'écriture pourraient être bidirectionnelles : la graphomotricité agit sur l'orthographe ou la rédaction directement ou en tant que médiateur, mais est également un sous-produit du développement des processus orthographiques et rédactionnels [traduction libre].

seul mouvement grâce à la procéduralisation des programmes moteurs, dont l'automatisation se poursuit jusqu'à l'adolescence (Alamargot et Morin, 2015; Rueckriegel et al., 2008).

En parallèle, nous avons vu que le développement de l'expertise en orthographe lexicale repose sur l'apprentissage du principe alphabétique et l'automatisation des correspondances phonème-graphème, qui se font généralement au cours des deux premières années de l'école primaire (Écalte et Magnan, 2015; Giasson, 2011; Morin et al., 2018). Ainsi, l'apprentissage des correspondances phonème-graphème, l'un des premiers jalons dans l'établissement de la procédure lexicale, tout comme la mise en place des programmes moteurs, représentent deux étapes essentielles à la production écrite d'un mot.

Sur un plan développemental, les chercheurs s'entendent sur le fait que la graphomotricité et l'orthographe « constituent de vrais écueils » (Pérez et Giraudo, 2016, p. 344) pour les élèves en début d'apprentissage. En effet, ces deux composantes apparaissent toujours, dans une langue opaque comme celle du français, en construction en première (6 ans) et deuxième (7 ans) années. En troisième année (8 ans), les élèves maîtrisent généralement bien les règles de correspondance phonème-graphème, alors que leur geste graphomoteur gagne en fluidité. Les programmes moteurs s'installent entre la troisième et la quatrième année (9-10 ans), et deviennent de plus en plus procéduralisés avec le temps (Guilbert et al., 2018; Kandel et Perret, 2014; Palmis et al., 2017; Wicki et Hurschler Lichtsteiner, 2018)

Dans cette perspective, la réussite dans une tâche de production écrite de mots isolés semble principalement, tant en copie qu'en dictée, gouvernée par une maîtrise minimale des traitements graphomoteurs (i.e. programmation et exécution du mouvement requis pour tracer l'allographe sélectionné) et des correspondances phonème-graphème (Pérez et Giraudo, 2016). Comme nous l'avons précisé dans la problématique, plusieurs moyens ont été utilisés dans les dernières années pour mettre en relation ces deux habiletés de bas niveau impliquées dans la production écrite, qui peuvent s'interférer l'une l'autre.

Les études corrélationnelles (cf. Annexe A), menées pour la plupart en anglais, ont mis en évidence une relation entre la graphomotricité et l'orthographe qui s'atténue au fur et

à mesure de la scolarité. Les études d'entraînement ont également montré qu'une intervention appropriée en matière de graphomotricité, conçue afin d'améliorer la qualité et la rapidité du tracé, permettait d'améliorer les performances en production écrite ou, de manière plus circonscrite, en orthographe (cf. Alves et al., 2016; Graham, Harris et Adkins, 2018; Lavoie, Morin, Coallier et Alamargot, 2019; Santangelo et Graham, 2016) – bien que les études sur ce point soient peu nombreuses. Même si ces travaux sont utiles pour comprendre le lien entre la graphomotricité et l'orthographe, une critique à ne pas négliger peut leur être adressée : en effet, ces études ont toutes confondu, pour l'orthographe, les procédures phonologique et lexicale en intégrant indistinctement dans leur corpus des mots fréquents, non-fréquents, consistants ou encore inconsistants (cf. Pontart et al., 2013). Nous ne savons donc pas, à l'heure actuelle, si la relation entre la graphomotricité et l'orthographe change, sur le plan développemental, en fonction des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots.

De leur côté, les études en temps réel que nous avons présentées dans le cadre théorique ont montré que les processus périphériques, qui permettent de traduire une représentation orthographique en réponse motrice, ne sont pas indépendants des traitements élaborés au niveau central. En effet, plusieurs chercheurs ont montré, en manipulant la régularité ou la consistance, le statut lexical ou la fréquence des items, que les processus responsables de la génération de l'orthographe exerçaient une influence considérable sur les processus graphomoteurs, pouvant opérer en cascade pendant la production du mouvement. Ces différents travaux menés tant chez les enfants que chez les adultes distinguent les déterminants de la réussite et de la vitesse en production orthographique, et montrent qu'un mot coûteux à traiter sur le plan cognitif réduit la gestion efficace, en parallèle, des processus mobilisés au cours de l'exécution graphomotrice – et en particulier la cascade des traitements (Lambert et Quémart, 2019; Olive, 2014). Bien que les résultats de ces études soient à leur tour utiles pour mieux comprendre la dynamique des processus graphomoteurs et orthographiques, ils présentent des spécificités et des contraintes méthodologiques qui en limitent la généralisation.

Par exemple, certaines études menées auprès d'enfants n'ont pas contrôlé de façon assidue la sélection des mots, en ne considérant pas, pour chaque tranche d'âge, la fréquence d'occurrence des mots dans la langue ou leur âge d'acquisition (Afonso et al., 2017; Gonzalez-Martin et al., 2017; Suarez-Coalla et al., 2018), ce qui constitue une limitation majeure pour étudier le développement de la production écrite.

D'autres ont été menées en espagnol (Afonso et al., 2015, 2017; Gonzalez-Martin et al., 2017; Suarez-Coalla et al., 2018), en allemand (Van der Plaats et Van Galen, 1990) et en norvégien (Sovik et al., 1994, 1996), des langues qui n'ont pas le même degré d'opacité orthographique que le français. Comme les correspondances entre les phonèmes et les graphèmes sont plus univoques dans ces langues qu'en français, elles évoluent plus vite, à la fois oralement et dans leur expression écrite (Sprenger-Charolles, Siegel et Bonnet, 1998).

En outre, les études dont nous avons fait la revue dans les dernières sections ont eu recours à une diversité de tâches d'écriture manuscrite pour évaluer le chevauchement des processus centraux et périphériques en cours d'écriture, qu'on pense à la copie de mots isolés ou successifs, au rappel immédiat, à la dictée, à la dénomination écrite à partir d'images ou à la production d'un texte, ce qui rend les conclusions difficiles à tirer (cf. Afonso et al., 2015, 2017; Bonin et al., 2015; Gonzalez-Martin et al., 2017; Kandel et Perret, 2015; Lambert et al., 2008, 2015; Maggio et al., 2012; Sausset et al., 2012; Sovik et al., 1994, 1996; Suarez-Coalla, 2018). En effet, ces tâches n'imposent pas toutes chez les scripteurs les mêmes contraintes cognitive, mémorielle et/ou langagière (Bonin et al., 2015; Lambert et al., 2012; Pérez et al., 2012).

Les recherches que nous avons présentées ont chacune adopté une approche descendante de l'écriture, s'intéressant à une relation à « sens unique » entre les traitements orthographiques et les traitements graphomoteurs. À preuve, aucune étude n'a, à notre connaissance, contrôlé initialement les habiletés graphomotrices des participants, même si celles-ci peuvent, comme nous l'avons mis en relief dans la problématique, interférer avec les traitements orthographiques (cf. Olive, 2014). Sur le plan développemental, le facteur

graphomoteur a été invoqué uniquement à partir du niveau scolaire des élèves, et n’a jamais été évalué directement, en lui-même.

Par ailleurs, aucune étude, à part celle d’Afonso et al. (2015) menée auprès d’adultes, n’a évalué les capacités langagières et mémorielles préalables des participants, même si elles peuvent influencer le déroulement des processus de bas niveau et le recours aux procédures phonologique et lexicale (Bonin et al., 2015; Fayol et al. 2009; Pacton et Afonso Jaco, 2015; Share, 1999). Ce constat appuie l’idée de resserrer encore davantage les critères de sélection des participants.

Dans certaines études, les participants devaient écrire en lettres majuscules (Afonso et al., 2015; Kandel et al., 2019; Roux et al., 2013), avec un crayon sans encre (Afonso et al., 2015), en soulevant le crayon entre chaque lettre (Roux et al., 2013; Sausset et al., 2012) ou, au contraire, en étant obligés de maintenir en tout temps le crayon sur la feuille (Hulstijn et Van Galen, 1983). Ce mouvement, qui n’est pas naturel même pour des experts, pourrait avoir dénaturé l’activité de production. Il est donc possible que les résultats obtenus par ces chercheurs soient, en partie, un artéfact des conditions expérimentales particulièrement coûteuses, qui entraînent une « désautomatisation » du geste (Lambert et al., 2012). Les unités de traitement utilisées en écriture sont en effet susceptibles, comme le soulèvent Sausset et al. (2013), de changer d’un allographe à l’autre.

Sans nier l’effet *top-down* de l’écriture, selon lequel les traitements graphomoteurs sont sous la dépendance de facteurs orthographiques, nous pouvons faire l’hypothèse, en accord avec la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996) et les principes du modèle d’Anderson (1983), que les processus graphomoteurs peuvent aussi affecter, en retour, la réussite et le décours temporel des traitements orthographiques – ce que suggèrent d’ailleurs les études corrélationnelles ou celles d’entraînement ayant étudié l’impact de la graphomotricité sur les performances en orthographe (cf. Kent et Wanzek, 2016).

Une étude réalisée par Sausset et al. (2012) témoigne en faveur de cet effet *bottom-up*. En effet, cette dernière montre, dans une tâche de rappel immédiat, que la coordination entre les processus centraux et périphériques ne dépend pas seulement des caractéristiques

lexicales et sous-lexicales des mots, mais aussi des contraintes graphomotrices de la tâche. Dans cette étude, des adultes devaient copier des mots bi- et trisyllabiques sous quatre conditions : a) en lettres scriptes minuscules, b) en lettres scriptes majuscules, c) en lettres scriptes majuscules sous grand format, et d) en lettres scriptes majuscules sous grand format, sans rétroaction visuelle. Les résultats montrent que les syllabes d'un mot ne peuvent pas, lorsque les contraintes graphomotrices sont élevées, soit lorsque les participants ont recours à un allographe connu mais peu utilisé ou rarement paramétré, être entièrement programmées pendant la période de latence comme elles le sont généralement chez les experts (cf. Sausset et al., 2016).

Les traitements graphomoteurs peuvent donc eux aussi, sous certaines conditions et en fonction du niveau d'expertise des scripteurs, mobiliser des ressources cognitives et affecter l'organisation des processus impliqués lors de la production écrite d'un mot. En effet, la préparation et l'exécution du message pourraient être retardées ou segmentées quand les contraintes deviennent plus importantes, quel que soit le niveau hiérarchique, dans le modèle de Van Galen (1991), auquel ces contraintes sont appliquées. La longueur des mots (Afonso et al., 2015; Bonin et al., 2015; Cossu et al., 1995; Gonzalez-Martin et al., 2017; Hulstijn et Van Galen, 1983; Lété et al., 2008; Planton et al., 2017; Sovik et al., 1994, 1996; Suarez-Coalla et al., 2018; Van der Plaats et Van Galen, 1990) et l'imposition d'une forme allographique, via l'utilisation de lettres majuscules (Bourdin et Fayol, 1994, 2002; Grabowski, 2010; Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002; Sausset et al., 2012), constituent deux de ces contraintes. Elles sont susceptibles d'entraîner une augmentation du coût cognitif en mémoire de travail et de compromettre ainsi le maintien et/ou le rafraîchissement des représentations orthographiques au sein du *buffer* graphémique.

Dans cette optique, l'étude d'Afonso et al. (2017) montre que l'effet de fréquence est plus prononcé pour les élèves de 7 ans que pour ceux de 9 et 11 ans, en considérant aussi bien le temps de latence que la durée de production des deux premières lettres d'un mot. Or, cette étude ne précise pas a) si l'effet de fréquence observé sur la durée de production est relié à la poursuite des traitements orthographiques entamés pendant la latence, qui ne sont

pas encore résolus chez les élèves les plus jeunes avant d’amorcer l’écriture⁴⁵ (effet *top-down*), ou b) si la programmation et l’enchaînement des lettres, qui sont plus ardues pour les élèves de 7 ans qui n’ont pas encore développé de programmes moteurs, peuvent surcharger la mémoire de travail, ce d’autant plus que les mots sont rares, et donc entraîner un ralentissement de l’écriture (effet *bottom-up*). Il est possible que l’effet de fréquence observé par ces chercheurs soit médiatisé par le niveau d’habiletés graphomotrices des scripteurs, qui peut entraîner une perte d’informations en mémoire nécessitant de réencoder les représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique ou de recalculer l’orthographe des mots (Pontart et al., 2013).

L’état actuel des connaissances scientifiques ne permet pas de déterminer avec précision a) la nature de la relation entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques au cours de la production écrite d’un mot chez des scripteurs d’âge primaire, et b) comment cette relation évolue en fonction du coût cognitif des traitements graphomoteurs et de la complexité des traitements orthographiques.

Trois études expérimentales ont été menées dans le cadre de cette recherche doctorale afin d’approfondir cette question de recherche. Les prochains chapitres décrivent pour chacune les objectifs et les hypothèses de recherche, les choix méthodologiques adoptés pour les opérationnaliser, les résultats et leur interprétation, ainsi que les limites et perspectives.

5. PRINCIPES GÉNÉRAUX APPLIQUÉS POUR LES TROIS ÉTUDES

5.1 Critères d’inclusion des participants

Tous les participants étaient non-redoublants, de langue maternelle française, avec une audition et une vision normales ou corrigées, sans troubles spécifiques ou généraux d’apprentissage signalés. Seuls les participants ayant obtenu par écrit le consentement libre et éclairé de leurs parents ou tuteurs ont été rencontrés.

⁴⁵ D’autant plus que les mots proposés aux participants n’ont pas été contrôlés pour chaque groupe.

Les participants de chacune des études ont été soumis à une série d'épreuves standardisées évaluant leurs capacités intellectuelles (*Matrices progressives de Raven, PM38* : Raven, 1998), mémorielles (*Mémoire des chiffres* : Wechsler, 2007) et sensorimotrices (un ou plusieurs sous-tests des Fonctions sensorimotrices de la NEPSY-II : *Tapping; Précision visuo-motrice; Imitation de positions de mains; Séquences motrices manuelles* : Korkman, Kirk et Kemp, 2012 et/ou *Test d'intégration visuo-motrice* : Beery et Beery, 2004), ainsi que leurs compétences en lecture (*La pipe et le rat* : Lefavrais, 1986 ou deux sous-tests du WIAT-II : *Lecture de mots* et *Décodage de pseudo-mots* : Wechsler, 2005) et en orthographe (*Test de niveau orthographique*, TNO : Doutriaux et Lepez, 1980 ou un sous-test du WIAT-II : *Orthographe* : Wechsler, 2005). Seuls les participants ayant un score compris entre plus ou moins deux écarts-types de la moyenne de leur groupe pour l'ensemble de ces épreuves, ainsi que pour les mesures graphomotrices considérées, ont été retenus. Ces critères d'inclusion permettaient de constituer un échantillon homogène (i.e. éviter les valeurs extrêmes) et de mieux contrôler certaines habiletés sous-jacentes impliquées dans le développement de la graphomotricité et de l'orthographe (cf. Alamargot et al., 2014; Fayol et Miret, 2005).

5.2 Conditions d'application des tests statistiques

Tous les tests statistiques qui sont présentés ci-après ont été exécutés avec le logiciel SPSS²³©. Les prémisses de normalité, d'homogénéité des variances et d'égalité des matrices de covariance ont été vérifiées à partir d'un examen visuel de chacune des distributions (boîtes à moustaches), de l'analyse des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement⁴⁶, du test de Levene et du test M de Box. Des tests de Student et des analyses de variance à mesures répétées (ANOVA) ont été effectués pour les comparaisons de moyennes. Les tailles d'effet des facteurs et de leur interaction ont été interprétées, via l'indice éta-carré partiel, selon les balises établies par Cohen⁴⁷ (1988, dans Pallant, 2010).

⁴⁶ Le rapport entre ces indices et leur erreur standard ne doit pas excéder ± 2 pour l'application de tests paramétriques (Field, 2009).

⁴⁷ Les seuils sont les suivants : $\eta^2 = 0.01$: très faible; $\eta^2 = 0.20$: faible; $\eta^2 = 0.50$: moyenne; $\eta^2 = 0.80$: élevée.

Des tests-t à échantillons appariés (comparaisons partielles) avec ajustement de Bonferroni⁴⁸ ont par ailleurs été réalisés afin de situer, en présence d'une interaction significative, les différences entre deux moyennes.

⁴⁸ Afin de réduire le risque de commettre une erreur de type 1, la correction de Bonferroni ajuste le niveau alpha, fixé à .05 dans notre cas, en fonction du nombre de comparaisons multiples qui sont effectuées. Par exemple, le seuil de signification lorsque deux comparaisons sont faites est de .025 (.05/2), alors qu'il est plutôt de .017 (.05/3) lorsque trois comparaisons sont nécessaires (Field, 2009).

TROISIÈME CHAPITRE

ÉTUDE 1

Ce troisième chapitre présente la première étude, dont l'objectif est d'évaluer les effets d'une variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice sur le nombre d'erreurs orthographiques produites lors de l'écriture de mots isolés dont le traitement orthographique est plus ou moins complexe à réaliser.

1. FONDEMENTS THÉORIQUES

Comme nous l'avons abordé dans le deuxième chapitre, la théorie capacitaire conduit à concevoir une compétition entre les processus les plus exigeants face à la nécessité de puiser leurs ressources cognitives dans un réservoir attentionnel unique (Chanquoy et Alamargot, 2003). La mise en œuvre d'un processus peut alors s'opérer au détriment d'un autre au cours d'une activité, conduisant à un ralentissement dans le décours des traitements et/ou à la production d'erreurs (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996).

À défaut d'être automatisés, les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques ont un coût cognitif plus ou moins fort en production écrite. Bourdin et Fayol (1994) ont ainsi montré que les performances d'enfants âgés de 8 à 10 ans, mais non celles d'adultes pour lesquels les ressources mobilisées par les traitements graphomoteurs sont faibles en raison de leur automatisation, étaient meilleures sous la modalité orale que sous la modalité écrite dans une tâche de rappel sériel de mots. Or, les performances des adultes chutaient pour approcher celles des enfants lorsqu'ils avaient pour consigne de rappeler les mots en lettres majuscules cursives, connues mais rarement utilisées en production écrite. Une programmation graphomotrice plus coûteuse est ainsi susceptible de limiter la quantité de ressources cognitives disponibles pour assurer la rétention et la récupération des unités lexicales stockées temporairement dans la mémoire de travail. L'étude de Bourdin et Fayol (*Ibid.*) a également montré que la gestion des difficultés orthographiques au cours d'une tâche de rappel sériel de mots consommait des ressources cognitives chez les scripteurs, indépendamment de celles associées à la graphomotricité. En effet, les performances des

enfants et des adultes étaient plus faibles lorsqu'ils avaient à rappeler des mots non-fréquents que des mots fréquents. La conjoncture des résultats obtenus par ces chercheurs montre que les processus de bas niveau peuvent affecter, selon leur degré d'automatisation (i.e. efficience des traitements), la mise en œuvre des processus de haut niveau (effet *bottom-up*).

D'autres travaux ont montré que les performances rédactionnelles des adultes étaient dégradées par une augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice, tel que suscité lorsqu'ils écrivent en majuscules cursives et non en minuscules (Olive et al., 2007, 2009, Olive et Kellogg, 2002). Ces études ont montré que le recours à un allographe peu voire jamais utilisé pour écrire des mots, et encore moins un texte entier, diminuait la fluence rédactionnelle, la longueur des phrases et la qualité des textes produits. La gestion de l'activité devenait ainsi plus difficile au point sans doute d'approcher les limites capacitaires.

De nombreuses études corrélationnelles menées auprès d'enfants ont montré que la relation entre les habiletés graphomotrices et la réussite orthographique était significative auprès d'élèves du primaire (cf. Annexe A), mais non auprès d'élèves du secondaire chez lesquels les processus de bas niveau sont probablement automatisés (Pontart et al., 2013). Ces études ne précisent toutefois pas si cette relation est dépendante de la consommation respective des ressources cognitives de la graphomotricité et de l'orthographe, dont le coût est susceptible de se moduler avec les caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots. Similairement, Fayol et Miret (2005) ont montré que les habiletés graphomotrices expliquaient près de la moitié de la variance associée à la réussite orthographique dans une tâche de dictée chez des élèves de 8 ans considérés « faibles » sur le plan graphomoteur, alors qu'elles ne contribuaient pas à l'explication des performances orthographiques chez ceux qui étaient considérés « forts ». Ces résultats suggèrent qu'une part des erreurs d'orthographe pourrait être la conséquence indirecte de traitements graphomoteurs trop coûteux, captant des ressources cognitives qui doivent être dédiées aux processus orthographiques. Toutefois, ces résultats ne fournissent pas d'indications quant aux fonctions (i.e. traitement et/ou maintien) impliquées dans la production orthographique qui sont affectées par la diminution des ressources cognitives associée aux difficultés graphomotrices.

2. OBJECTIF DE RECHERCHE

Au vu des résultats de recherche antérieurs (Bourdin et Fayol, 1994; Fayol et Miret, 2005; Pontart et al., 2013), cette première étude vise a) à confirmer la relation entre les processus graphomoteurs et les processus orthographiques chez des élèves de troisième année (CE2), et b) à préciser la nature de l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur la réussite orthographique, en fonction de la complexité plus ou moins élevée des traitements à effectuer. À notre connaissance, cette question n'a jamais été abordée auparavant.

Plus spécifiquement, l'objectif de cette étude est de déterminer si – et en quoi – le coût cognitif de la programmation graphomotrice a un effet sur le nombre d'erreurs orthographiques produites lors de l'écriture de mots isolés, lorsque les traitements orthographiques sont eux-mêmes coûteux et puisent dans un réservoir unique de ressources cognitives. Afin d'y répondre, il est nécessaire de faire varier le coût cognitif de la programmation graphomotrice d'un côté, et la complexité des traitements orthographiques de l'autre.

2.1 Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice

Deux questions se posent ici : comment le coût cognitif de la programmation graphomotrice peut-il être manipulé chez un même élève, en tâchant de conserver le même environnement d'écriture (i.e. même surface, même crayon, même(s) feedback(s) en disponibilité)? Comment ce coût peut-il être maintenu constant tout au long de la production écrite d'un mot?

Le modèle d'Ellis (1982) postule l'existence de deux systèmes en aval du *buffer* graphémique, dont le rôle est de coder temporairement l'identité et l'ordre des graphèmes le temps nécessaire à l'exécution graphomotrice. D'une part le « système allographique », qui attribue une forme spécifique à chacune des lettres (i.e. minuscule, majuscule, script, cursive). D'autre part le « système des patterns moteurs graphiques », qui permet de programmer, en fonction de l'allographe sélectionné, la séquence des traits nécessaires à sa réalisation (nombre, direction, ordre). Chaque allographe fait donc référence à un programme

moteur spécifique stocké en mémoire à long terme qu'il s'agit de rappeler (Van Galen, 1991). Pour le mot « diable » par exemple, les graphèmes « d/i/a/b/l/e » sont stockés temporairement dans le *buffer* graphémique. En minuscules cursives, le scripteur sélectionne l'allographe souhaité pour la production de la première lettre (*d*), convoque depuis la mémoire à long terme son programme moteur lorsqu'il est disponible, puis exécute le geste nécessaire pour laisser une trace sur le papier, et ainsi de suite (*diab^lle*). Accéder à ces différents programmes moteurs nécessite un temps de récupération, plus ou moins long selon leur degré de procéduralisation. Ce temps d'accès est probablement plus rapide pour des programmes moteurs déjà automatisés, comme ceux de notre signature (cf. Bara et Gentaz, 2010; Hulstijn et Van Galen, 1983; Marcelli et al., 2013), que pour ceux en cours de structuration ou de procéduralisation. En effet, la pratique régulière ou la répétition d'une activité renforce les procédures stockées en mémoire à long terme, entraînant un gain de précision et de vitesse (Anderson, 1983).

Afin de localiser la charge mentale uniquement sur la programmation graphomotrice, et non sur la disponibilité des représentations allographiques, nous proposons de faire varier l'allographe de production (Brun-Henin et al., 2012), en demandant aux élèves de produire des mots en minuscules cursives (e.g. *diable*) et en majuscules scriptes (e.g. D I A B L E).

Sur ce point, il nous semble préférable de ne pas mobiliser les majuscules cursives (e.g. *DIABLE*) contrairement à ce que d'autres chercheurs ont fait après d'adultes (Bourdin et Fayol, 1994; Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002). En effet, cet allographe est très rarement rencontré et pratiqué dans le système scolaire, contrairement aux majuscules scriptes qui sont apprises à la maternelle et qui font donc l'objet d'une pratique précoce (Bara et Bonneton-Botté, 2015). Ces dernières sont en effet plus faciles à percevoir et à reproduire graphiquement, tout en étant reconnues plus conformes aux habiletés psychomotrices des enfants (Ministère de l'éducation nationale, 2015). Par ailleurs, les lettres majuscules scriptes sont lues et produites tous les jours par les élèves selon des règles bien spécifiques (e.g. à chaque début de phrase, après un point, pour la première lettre d'un nom

propre). Ainsi, la connaissance de ces lettres est vraisemblablement bien installée chez des élèves du primaire.

Or, leur fréquence d'utilisation est considérablement réduite comparativement à celle des lettres minuscules cursives. Par conséquent, l'activation des allographes et de leurs programmes moteurs correspondants, qui sont plus ou moins procéduralisés, prend probablement plus de temps en majuscules scriptes qu'en minuscules cursives.

En outre, le recours aux lettres majuscules scriptes entraîne une autre source de difficulté au cours de la production écrite d'un mot. De fait, leur succession agit comme une « tâche secondaire » : elle engage des opérations exécutives nécessitant a) une inhibition – et le maintien de cette inhibition de façon permanente – des programmes moteurs des lettres minuscules cursives qui sont probablement activés automatiquement (*dD/ú/αA/bB/ℓ/e* E) pendant la tâche, mais qui sont non pertinents pour sa réalisation, et b) une séquentialisation des mouvements d'écriture, forçant un traitement sériel ou lettre par lettre (D I A B L E vs *diab!le*), ce qui n'est pas une condition naturelle pour des élèves habitués d'écrire en cursives.

Deux arguments viennent donc justifier le recours aux lettres majuscules pour augmenter le coût cognitif de la programmation graphomotrice : l'accessibilité plus ou moins rapide des programmes moteurs en mémoire à long terme doublée d'opérations exécutives, qui garantissent que ce coût est maintenu constant tout au long de la production écrite d'un mot.

Afin de démontrer la validité de ces arguments sur le plan méthodologique, il apparaît nécessaire d'isoler et de tester au préalable les effets d'une variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice sur la production d'un mot qui sollicite a) peu voire pas du tout de traitements orthographiques, et b) pour lequel les programmes moteurs – en minuscules cursives – sont facilement accessibles, ayant déjà été procéduralisés voire automatisés (i.e. ayant probablement le format d'un ensemble de lettres ou d'un *chunk* récupéré tel quel en mémoire à long terme), ce qui permet au mouvement d'être programmé entièrement à l'avance. La tâche du prénom est pertinente dans ce contexte puisqu'elle

s'appuie sur des correspondances phonème-graphème mémorisées à un jeune âge et pouvant être récupérées directement (Alamargot et al., 2014; Alamargot, Morin et Simard-Dupuis, 2018; Pontart et al., 2013), tout en faisant l'objet d'une pratique précoce et fréquente tant à l'école que dans les diverses situations de la vie courante (Both-de Vries et Bus, 2010; Écal, 2004; Levin, Both-de Vries, Aram et Bus, 2005; McNeill, Wasterveld, van Bysterveldt, Boyd et Gillon, 2013; Puranik et Lonigan, 2012, 2014). En France, l'entraînement à l'écriture cursive est initié en moyenne section à partir du prénom des élèves, une base qui sert à l'apprentissage de l'enchaînement des lettres et au développement de la fluidité du geste (Ministère de l'éducation nationale, 2015). Selon Olive et al. (2007, 2009), le coût cognitif des traitements graphomoteurs peut être mesuré en comparant la fluence de production en lettres minuscules et en lettres majuscules.

2.2 Variation de la complexité des traitements orthographiques

Comme nous l'avons précisé dans le cadre théorique, la représentation orthographique d'un mot, issue du traitement de la voie lexicale et/ou sous-lexicale, est déposée dans le *buffer* graphémique (Rapp et al., 2002). La voie lexicale permet l'activation et la récupération directes des représentations sémantique, phonologique et orthographique des mots connus stockés en mémoire à long terme. Pour sa part, la voie sous-lexicale mobilise un mécanisme de conversion phonème-graphème pour les mots inconnus autorisant la construction active de l'orthographe en mémoire de travail. La fréquence des mots et la consistance moyenne des associations phonème-graphème permettent ainsi de caractériser deux types de voies composées de processus distincts lors de la production écrite d'un mot : l'une traitant les mots fréquents par adressage, ce qui se fait de façon rapide; l'autre traitant les mots non-fréquents par médiation phonologique, ce qui se fait de façon relativement lente (Bourdin et Fayol, 1994; Ferrand et al., 2018). Notre postulat est que la première voie sollicite moins de ressources cognitives que la seconde (i.e. processus automatisé vs processus contrôlé).

La médiation phonologique engendre peu d'erreurs lorsqu'il s'agit d'orthographier un mot non-fréquent et consistant, puisqu'à chaque unité sonore ne correspond qu'une seule

unité graphémique. Ce mécanisme conduit toutefois à des productions erronées pour les mots non-fréquents et inconsistants, qui contiennent des correspondances phonème-graphème ayant une probabilité d'apparition relativement faible en français (Bonin et al., 2008). Par exemple, le mot inconsistant « nourrice » augmente la difficulté et sans doute l'allocation en ressources cognitives comparativement au mot consistant « lardon », puisqu'il existe un graphème concurrent – plus fréquent – pour le phonème [r] (*r* vs *rr*) et le phonème [s] (*ss* vs *c*). Une compétition peut alors s'imposer entre les graphèmes issus du traitement lexical et du traitement sous-lexical (Bonin et Delattre, 2010). Comme le mot « lardon » peut être écrit correctement en recourant au graphème le plus fréquent pour chaque phonème, le risque de commettre une erreur est réduit.

Le caractère plus ou moins fréquent et plus ou moins *calculable* des correspondances phonème-graphème (i.e. la polygraphie) est probablement susceptible d'augmenter le coût cognitif en mémoire de travail et d'entraîner un « effet délétère » sur les performances orthographiques (Bonin et al., 2008, p. 519). Des études expérimentales menées auprès d'adultes et d'enfants ont ainsi montré que le pourcentage de mots erronés en production orthographique était plus élevé pour les mots non-fréquents que pour les mots fréquents, et ce d'autant plus qu'ils étaient inconsistants (Delattre et al., 2006; Gonzalez-Martin et al., 2017; Sovik et al., 1994).

Une question qui se pose ici est celle de la tâche permettant d'évaluer le recours aux procédures d'adressage et d'assemblage en production écrite de mots isolés. Selon Bonin et al. (2015), trois tâches permettent d'évaluer le fonctionnement de la voie lexicale : la dictée, la copie et la dénomination écrite à partir d'images. La dictée implique toutefois plus fortement que les deux autres l'intervention de la voie sous-lexicale. Comme elle débute par le traitement d'une entrée auditive (i.e. analyse acoustique), elle permet une activation préalable des codes phonologiques avant de les traduire en codes orthographiques (Bonin, 2003). Elle représente donc une tâche pertinente pour évaluer les effets de fréquence et de consistance orthographique (Pérez et Giraudo, 2016). Comptabiliser le nombre de mots erronés dans une tâche de dictée est une mesure suffisamment sensible pour évaluer l'impact des augmentations de coût(s) en mémoire de travail (Fayol et Miret, 2005).

Une dernière question qui se pose pour vérifier l'effet du coût cognitif de la programmation graphomotrice sur le nombre d'erreurs orthographiques produites, en fonction de la complexité plus ou moins élevée des traitements orthographiques, est celle de la mobilisation optimale des ressources cognitives par les scripteurs. Les processus orthographiques et les processus graphomoteurs ont chacun un coût cognitif, mais ce coût n'apparaît que lorsque de fortes contraintes sont imposées sur la production écrite, en exécutant par exemple une tâche dans un délai imparti (Afonso et al., 2017; Connelly et al., 2005; Gonzalez-Martin et al., 2017; Suarez-Coalla et al., 2018). Sans ce type de contraintes, les scripteurs ont tendance à distribuer stratégiquement chacun des processus dans le temps afin de prévenir ou d'éviter des interférences (Bourdin, 1999; Bourdin et Fayol, 1994; Fayol et Miret, 2005), autrement dit afin de rester dans la limite de leurs ressources cognitives (i.e. pour éviter toute surcharge cognitive). Afin de mettre en évidence l'existence d'une compétition ou d'un *trade-off* (Barrouillet et Camos, 2007; Just et Carpenter, 1992) entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques (Torrance et Galbraith, 2006), il nous semble pertinent d'imposer une contrainte de vitesse lors de la production écrite, en demandant aux élèves d'écrire le plus vite, mais le mieux possible. Une telle consigne permet de maximiser leur engagement dans la tâche sans pour autant sacrifier la qualité du tracé.

L'hypothèse de cette première étude est donc la suivante : dans le cadre de la théorie capacitaire, l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice retirera des ressources cognitives aux processus orthographiques qui feront alors défaut, ce qui provoquera des erreurs d'autant plus nombreuses que les traitements orthographiques sont complexes (i.e. exigent des calculs coûteux).

Le choix de la population apparaît ici déterminant pour préciser sur quels mécanismes la compétition entre les processus graphomoteurs et les processus orthographiques agit. En effet, il faut sélectionner un âge où les scripteurs ne sont pas encore « novices », auquel cas ces processus n'entreraient pas en compétition et n'interagiraient donc pas (Fayol et Lété, 2012; Just et Carpenter, 1992), ni un âge où ils sont « experts », auquel cas ces processus seraient déjà automatisés et finalement peu sensibles aux interférences (Bourdin et Fayol, 1994; Schelstraete et Maillart, 2004). Sur la base de travaux antérieurs (Fayol et Miret, 2005;

Hurschler Lichtsteiner, Wicki et Falmann, 2018; Thibon et al., 2018a), il nous apparaît pertinent de sélectionner des élèves de troisième année (CE2) pour les raisons suivantes : a) ils maîtrisent les règles de correspondances phonème-graphème, ce qui leur permet de calculer efficacement l'orthographe des mots en recourant à la voie d'assemblage (Morin et al., 2018), et b) leurs programmes moteurs sont en cours de procéduralisation; autrement dit, ces élèves disposent d'un bon niveau de représentations allographiques, mais la programmation des lettres exige toujours un certain coût cognitif (Palmis et al., 2017).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Participants

Cent dix-huit élèves de troisième année (CE2), dont 63 filles et 55 garçons, ont participé à cette étude ($M = 8.29$ ans; $ÉT = 0.31$). Ces participants ont été recrutés dans dix écoles au sein des académies de Créteil et de Poitiers (France). L'échantillon comportait 101 droitiers et 17 gauchers, ayant tous appris l'écriture cursive dès la fin de la maternelle. Ces participants ont été retenus selon les critères d'inclusion présentés à la fin du deuxième chapitre.

3.2 Tâches

3.2.1 Tâches d'inclusion

Six tâches d'inclusion ont été réalisées par les participants. Les « Matrices progressives de Raven » (Raven, 1998) ont été utilisées pour évaluer leurs aptitudes non-verbales. Ce test mesure la capacité de raisonnement logique. Il se compose de 60 séries, présentées en noir et en blanc, regroupées en cinq ensembles. Chaque série comprenait une figure partiellement dessinée que les participants devaient compléter avec l'une des solutions proposées. Une version abrégée de cette épreuve, comprenant 18 séries, a été administrée. Chacune s'enchaînait selon des durées prédéterminées, variant entre 15 et 60 secondes.

Le test de lecture silencieuse « La pipe et le rat » (Lefavrais, 1986) a été utilisé pour évaluer les habiletés de décodage. Pour cette épreuve, les participants devaient lire une suite

de mots isolés parmi lesquels se trouvaient des noms d'animaux qu'ils devaient, au fur et à mesure, souligner. Ce test, d'une durée maximale de trois minutes, comporte 486 noms, dont 243 animaux.

Une version courte (cf. Alamargot et al., 2014, 2018; Morin et al., 2018) du « Test de niveau orthographique » (Doutriaux et Lepez, 1980) a été utilisée afin d'évaluer l'aptitude générale à orthographier des mots sans interférence graphomotrice. Les participants devaient cocher la bonne forme orthographique d'un mot dans une phrase, parmi trois suggestions. Par exemple : « Le magasin est fermé durant les _ » : a) travail, b) travaux, c) traveau; « Julie cueille des fleurs et les _ à sa maman » : a) donne, b) donnees, c) donnent.

L'épreuve « Mémoire des chiffres » du WISC-IV (Wechsler, 2007), issue de la version francophone de l'*Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants*, a été utilisée pour évaluer l'empan mnésique. Les participants devaient rappeler un maximum de 32 séries de chiffres de plus en plus longues en ordre direct et en ordre inverse (8 items composés de 2 essais pour chacun des ordres). L'épreuve a été arrêtée après deux échecs consécutifs pour un même item.

L'épreuve « Tapping » de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012) a été utilisée afin d'évaluer la dextérité digitale, la rapidité motrice et la programmation motrice rapide. Pour le « Tapping répétitif », les participants devaient faire un cercle avec le bout du pouce et le bout de l'index, l'ouvrir d'environ 2.5 cm, le fermer, et répéter le geste aussi vite que possible. Le chronomètre était arrêté après 20 mouvements produits correctement ou jusqu'à ce que 60 secondes se soient écoulées. Pour le « Tapping séquentiel », les participants devaient joindre avec le bout du pouce le bout de l'index, puis le bout du majeur, puis le bout de l'annulaire, puis le bout de l'auriculaire afin que les doigts forment chaque fois un cercle. Le chronomètre était arrêté après cinq séquences correctes ou jusqu'à ce que 90 secondes se soient écoulées. Ces deux épreuves ont été réalisées avec la main dominante et la main non-dominante.

Le « Test d'intégration visuo-motrice » du BEERY-VMI (Beery et Beery, 2004) a également été administré afin d'évaluer la capacité des participants à intégrer leurs habiletés

visuelles et motrices. Ces derniers devaient copier selon une séquence développementale 30 formes géométriques à l'aide d'un stylo. Leurs performances ont été évaluées selon une échelle ordinale à deux niveaux (réussite ou échec) d'après des critères spécifiques pour chaque item.

3.2.2 Tâche graphomotrice

Les participants devaient rappeler par écrit les lettres de leur prénom en minuscules (cursives) et en majuscules (scriptes) pendant 30 secondes, le plus rapidement, mais le mieux possible (adaptée de Pontart et al., 2013).

3.2.3 Tâche expérimentale

Les participants devaient produire sous dictée 40 mots variant en fréquence et en consistance, soit 20 en lettres minuscules (cursives) et 20 en lettres majuscules (scriptes), le plus rapidement, mais le mieux possible.

3.3 Matériel

Pour la tâche expérimentale, 40 mots bisyllabiques, variant en fréquence et en consistance, ont été sélectionnés au sein de la base de données lexicales *Manulex-Infra* (Peereman, Lété et Sprenger-Charolles, 2007) de la troisième année (CE2), soit 10 mots fréquents et consistants (F/C), 10 mots fréquents et inconsistants (F/NC), 10 mots non-fréquents et consistants (NF/C), ainsi que 10 mots non-fréquents et inconsistants (NF/NC). Ces mots ont été répartis en deux listes (Liste A/Liste B), qui devaient être écrites soit en lettres minuscules, soit en lettres majuscules, appariées selon un ensemble de mesures linguistiques, dont : a) la fréquence lexicale, b) la consistance moyenne des associations phonème-graphème, c) le nombre de lettres, d) le nombre de phonèmes, e) le nombre de graphèmes, f) le point d'unicité orthographique, g) le nombre de voisins orthographiques, h) la fréquence de la première syllabe, i) la fréquence de la seconde syllabe, et j) la fréquence bigrammique moyenne. La liste des stimuli sélectionnés, ainsi que leurs caractéristiques linguistiques, sont rapportées aux annexes B et C.

L'analyse de variance (ANOVA) réalisée avec la Liste comme facteur à deux modalités et l'ensemble des mesures linguistiques comme variables dépendantes ne montre aucune différence significative entre la Liste A et la Liste B pour le nombre de lettres ($F(1,39) = 0.04$, $CM = .03$, $p > .85$, $\eta^2 = .03$), le nombre de phonèmes ($F(1,39) = 0.25$, $CM = 0.10$, $p > .61$, $\eta^2 = .08$), le nombre de graphèmes ($F(1,39) = 0.05$, $CM = 0.03$, $p > .81$, $\eta^2 = .04$), le point d'unité orthographique ($F(1,39) = 0.05$, $CM = 0.10$, $p > .81$, $\eta^2 = .04$), le nombre de voisins orthographiques ($F(1,39) = 0.10$, $CM = 593$, $p > .75$, $\eta^2 = .05$), la fréquence de la première syllabe ($F(1,39) = 1.93$, $CM = 242449340$, $p > .17$, $\eta^2 = .22$), la fréquence de la seconde syllabe ($F(1,39) = 0.72$, $CM = 1571726$, $p > .40$, $\eta^2 = .14$), la fréquence bigrammique moyenne ($F(1,39) = 0.00$, $CM = 310$, $p > .99$, $\eta^2 = .00$), la fréquence lexicale ($F(1,39) = 0.01$, $CM = 24$, $p > .92$, $\eta^2 = .02$) et la consistance moyenne des associations phonème-graphème ($F(1,39) = 0.10$, $CM = 30$, $p > .75$, $\eta^2 = .05$).

Les analyses de variance univariées réalisées avec la Fréquence et la Consistance comme facteurs fixes et chacune des mesures linguistiques comme variables dépendantes montrent que l'effet principal du facteur Fréquence est uniquement significatif pour la fréquence lexicale ($F(1,40) = 217.65$, $CM = 96698$, $p < .001$, $\eta^2 = .86$), alors que l'effet principal du facteur Consistance est uniquement significatif pour la consistance moyenne des associations phonème-graphème ($F(1,40) = 171$, $CM = 9431$, $p < .001$, $\eta^2 = .83$). Aucune autre différence significative n'a été relevée.

Comme attendu, les mots que nous avons considérés comme étant NF ont une fréquence lexicale significativement plus faible ($M = 2.64$; $ÉT = 1.78$) que celle des mots F ($M = 95.70$; $ÉT = 27.53$), alors que les mots NC ont une consistance moyenne des associations phonème-graphème significativement moins élevée ($M = 61.46$; $ÉT = 7.43$) que celle des mots C ($M = 92.17$; $ÉT = 7.22$).

Toutes les épreuves ont été réalisées sur papier, avec un stylo. Un chronomètre a été utilisé lors de la réalisation de la tâche graphomotrice afin de signaler l'arrêt.

3.4 Procédure

La collecte de données a été réalisée pendant les deux dernières semaines du mois de novembre 2017, par six expérimentateurs formés pour les besoins de l'étude.

3.4.1 *Ordre de passation des tâches*

Tous les participants ont effectué dans l'ordre, lors d'une première séance collective réalisée en classe ou à la bibliothèque de l'école, les tâches d'inclusion de lecture, d'orthographe, d'intelligence générale et d'intégration visuo-motrice. La durée de cette première séance, prise en charge par les expérimentateurs, était d'environ une heure.

Les participants ont ensuite été rencontrés individuellement afin de réaliser la tâche graphomotrice, la tâche expérimentale et les deux tâches d'inclusion restantes (i.e. *Tapping* et Mémoire des chiffres) pendant une quarantaine de minutes dans un local calme et silencieux de l'école (hors de la classe).

Dans un premier temps, ils ont rappelé par écrit les lettres de leur prénom en minuscules (ou en majuscules) pendant 30 secondes, avant de répéter la tâche en lettres majuscules (ou en minuscules).

Dans un deuxième temps, les participants ont accompli la tâche expérimentale. Comme indiqué dans le tableau 2, celle-ci a été réalisée en deux parties distinctes, comprenant 20 mots chacune. Une définition et une représentation imagée des mots étaient mises sur demande à la disposition des élèves (cf. Annexe F), afin de leur permettre de comprendre le sens de mots nouveaux (i.e. absents du lexique mental). Par exemple : « un harpon est un outil composé de crochets qui sert à pêcher des poissons ».

Les participants ont été soumis à l'épreuve « Tapping » de la NEPSY-II après la première partie de la tâche expérimentale et à l'épreuve « Mémoire des chiffres » du WISC-IV après la seconde partie.

Tableau 2
Ordre de passation des tâches à l'Étude 1

Séance	Durée	Tâches
Collective	60 minutes	1. La pipe et le rat
		2. Test de niveau orthographique
		3. Matrices progressives de Raven
		4. Test d'intégration visuo-motrice
Individuelle	40 minutes	1. Tâche graphomotrice
		2. Tâche expérimentale (partie 1)
		3. <i>Tapping</i>
		4. Tâche expérimentale (partie 2)
		5. Mémoire des chiffres

3.4.2 Contrôles méthodologiques

L'allographe de départ a été contrebalancé d'un participant à l'autre pour la tâche graphomotrice afin de limiter les effets de rang.

Comme la tâche expérimentale a été réalisée au cours d'une seule séance, nous avons choisi de ne pas faire produire les mêmes mots en lettres minuscules et en lettres majuscules chez un même participant. En effet, l'intervalle test-retest doit être d'une durée suffisante afin d'éviter un effet d'apprentissage, soit une mémorisation partielle d'un mot susceptible d'influencer la seconde production de ce mot. Quatre ordres de passation, contrebalancés d'un participant à l'autre, ont donc été déterminés pour la tâche expérimentale. Comme l'indique le tableau 3, l'allographe (variant en fonction de la liste de mots) a été alterné pour chaque série de 10 mots. Cette rotation a été faite afin d'éviter que les mots soient toujours écrits en lettres minuscules en début de tâche et en lettres majuscules en fin de tâche, ou inversement. Elle permettait donc de limiter les effets de rang, de fatigue et d'entraînement (i.e. habitude à la modalité d'écriture).

Tableau 3
Contrebalancement pour la tâche expérimentale à l'Étude 1

Ordre	Participant	Partie 1		Partie 2	
		Série 1 (10 mots)	Série 2 (10 mots)	Série 3 (10 mots)	Série 4 (10 mots)
1	S101	Majuscule (Liste A)	Minuscule (Liste B)	Majuscule (Liste A)	Minuscule (Liste B)
2	S102	Minuscule (Liste A)	Majuscule (Liste B)	Minuscule (Liste A)	Majuscule (Liste B)
3	S103	Majuscule (Liste B)	Minuscule (Liste A)	Majuscule (Liste B)	Minuscule (Liste A)
4	S104	Minuscule (Liste B)	Majuscule (Liste A)	Minuscule (Liste B)	Majuscule (Liste A)

3.4.3 Consignes

3.4.3.1 Consigne pour la tâche graphomotrice

La consigne suivante était donnée aux élèves pour la tâche graphomotrice : « À mon signal, j'aimerais que tu écrives ton prénom sur la ligne en lettres minuscules le plus de fois possibles, jusqu'à tant que je te demande d'arrêter. Tu dois écrire le plus vite, mais le mieux possible. Si tu complètes une ligne, tu peux poursuivre sur celle du dessous, et ainsi de suite. Si tu fais une erreur, tu peux faire un trait et recommencer ». La même consigne orale était donnée dans le cas de l'allographe majuscule, avec le changement de terme adéquat au sein de celle-ci.

Après l'énoncé de la consigne, l'expérimentateur donnait le signal à l'élève, en enclenchant le chronomètre. Après 30 secondes, il demandait à l'élève de cesser d'écrire, et ce même si la dernière lettre n'avait pas été entièrement formée. En cours de production, si un élève cessait d'écrire en lettres minuscules (ou en majuscules), l'expérimentateur faisait un rappel concernant l'allographe autant de fois que nécessaire (entre deux lettres).

3.4.3.2 Consigne pour la tâche expérimentale

Pour la tâche expérimentale, la consigne était la suivante : « Je vais te demander d'écrire plusieurs mots, un sur chaque ligne, parfois en lettres minuscules, parfois en lettres majuscules. Je te le préciserai chaque fois. Tu dois écrire le plus vite, mais le mieux possible. Si tu ne sais pas comment écrire le mot, fais de ton mieux, avec tes meilleures idées. Si tu

fais une erreur, tu peux faire un trait et recommencer. Si tu ne sais pas ce que le mot signifie, dis-le-moi et je pourrai te donner sa définition ou te montrer une image qui le représente. Tu dois écrire tous les mots au singulier ».

L'expérimentateur choisissait ensuite au hasard, en fonction de l'ordre attribué préalablement pour chacun des participants (cf. Tableau 3), 10 mots un à un dans un « jeu de cartes ». Il demandait à l'élève de les écrire en lettres minuscules ou en lettres majuscules, selon l'ordre établi. Après la première série de mots, l'expérimentateur changeait de liste et l'allographe de production était alterné – et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les mots aient été écrits. Un rappel concernant l'allographe était fait à la fin de chaque mot, dans le cas où un élève cessait d'écrire en lettres minuscules (ou en majuscules) au cours d'une série.

3.5 Variables mesurées

3.5.1 Mesures pour les tâches d'inclusion

Seules les notes brutes ont été analysées pour l'ensemble des tâches d'inclusion. Deux mesures ont été considérées pour le test « La pipe et le rat » : a) la « Rapidité de lecture linéaire », correspondant au nombre de mots lus dans l'intervalle de temps donné (i.e. vitesse de décodage), et b) la « Rapidité de compréhension lexicale », qui correspond au nombre d'animaux correctement repérés, minoré d'un point par nom souligné à tort. Pour le « Test de niveau orthographique », un score global sur 40 a été calculé, ainsi qu'un score pour les items évaluant l'orthographe lexicale et un autre pour les items évaluant l'orthographe grammaticale (sur 20 chacun). Un score global a aussi été calculé pour le « Tapping », tenant compte de la durée d'exécution des répétitions et de celle des séquences, réalisées tantôt avec la main dominante, tantôt avec la main non-dominante.

En raison de la complexité de codage du « Test d'intégration visuo-motrice » et des nombreux jugements à opérer pour chacune des figures (e.g. respect des proportions, taille des angles)⁴⁹, nous avons calculé un accord inter-juges pour 25 % des productions recueillies,

⁴⁹ Le nombre de critères pour chaque figure varie de 1 à 6, même si le système de cotation reste toujours binaire (0 ou 1). Par exemple : pour la « croix oblique », les critères sont : a) deux lignes qui se croisent, b) les lignes forment des angles entre 20°-70° et 110°-160°, et c) la plus longue des 4 pattes ne doit pas être plus de deux

ce qui correspond à 30 protocoles sur un total de 118 participants. Un coefficient de Kappa, établi à partir de la note attribuée par les deux juges pour chacune des figures, a ainsi été calculé, alors qu'un test-t à échantillons appariés a été réalisé pour situer les différences de moyennes entre les deux juges ($\kappa = .92$; $t(719) = 1.67$, $p > .10$). Selon les critères d'accord de Landis et Koch (1977)⁵⁰, le degré de concordance entre les deux cotations a été jugé excellent. Comme la cotation était suffisamment objective pour les autres tâches d'inclusion, reposant soit sur un seul critère de réussite ou d'échec soit sur le dénombrement (e.g. compter le nombre de mots lus pour « La pipe et le rat » ou le nombre de séquences réalisées correctement pour le « Tapping »), nous n'avons pas opéré de double codage.

3.5.2 *Mesure pour la tâche graphomotrice*

La fluence de production graphomotrice (lettres/minute) a été calculée pour le rappel écrit du prénom, soit le nombre de lettres reconnaissables à voix haute et non raturées produites en 30 secondes, multiplié par deux.

3.5.3 *Mesure pour la tâche expérimentale*

Le pourcentage de mots erronés (%) a été calculé pour la tâche expérimentale, ce qui correspond au nombre de mots erronés divisé par le nombre total de mots produits. Un mot a été jugé erroné dès qu'il s'écartait de la norme orthographique, indépendamment du nombre d'erreurs graphémiques qu'il comportait. Par exemple : « otruche » (1 erreur) ou « otruse » (2 erreurs) pour « autruche » correspondent à deux mots erronés, comptant chacun pour 1 dans le calcul du pourcentage. Pour des raisons pratiques, cette mesure n'a pas été complétée par celle de la fluence de production. En effet, il était impossible de contrôler la durée acoustique des mots (i.e. temps de prononciation) pour chacun des expérimentateurs. Comme les mots n'ont pas été produits dans un temps fixe comme à la tâche graphomotrice, il était

fois plus longue que la plus courte; pour le « losange horizontal » : a) présence de 4 coins (ouvertures sous 1/16"), b) deux angles aigus de 60° ou moins, c) axe horizontal compris entre 170°-190°, et d) côté le plus court au moins 2/3 du côté le plus long.

⁵⁰ Les ordres de grandeur sont les suivants : $\kappa < 0$: très mauvais (*poor*); $\kappa = 0.00$ à 0.20 : mauvais (*slight*); $\kappa = 0.21$ à 0.40 : passable (*fair*); $\kappa = 0.41$ à 0.60 : modéré (*moderate*); $\kappa = 0.61$ à 0.80 : fort (*substantial*); $\kappa = 0.81$ à 1.00 : presque parfait (*almost perfect*).

également plus difficile de mesurer avec précision leur durée de production à l'aide d'un chronomètre.

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'hypothèse expérimentale de cette étude était la suivante : le pourcentage de mots erronés à la tâche de dictée augmentera lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules, ce d'autant plus que les mots sont non-fréquents et inconsistants.

Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA) comportant trois facteurs intra-sujets a été réalisée, avec les participants (plan F_1) et les items (plan F_2) comme facteurs aléatoires, afin de vérifier les effets de l'Allographe de production (Min/Maj), de la Fréquence (F/NF) et de la Consistance (C/NC) sur le pourcentage de mots erronés. Nous avons contrôlé l'effet de la Liste de mots (Liste A/Liste B) en l'introduisant comme facteur inter-sujets. Son effet principal et ses interactions avec les facteurs expérimentaux n'étaient pas significatifs.

À titre de précaution méthodologique, un test de Student a été réalisé afin de vérifier l'effet de l'Allographe de production (Min/Maj) sur la fluence de production graphomotrice à la tâche du prénom.

4.1 Statistiques descriptives des tâches d'inclusion

Les scores bruts des participants à l'ensemble des tâches d'inclusion sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4
Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 1 : moyennes, (écarts-types),
minimum et maximum

	<i>M (ÉT)</i>	Min	Max
Intelligence générale			
Matrices de Raven	5.43 (2.15)	1	10
Compétences en lecture			
Décodage	77.53 (21.57)	30	128
Compréhension lexicale	34.10 (9.33)	12	55
Compétences en orthographe			
Lexicale	9.31 (2.53)	3	15
Grammaticale	8.36 (2.13)	4	15
Total	17.67 (3.24)	11	25
Capacités mémorielles			
Empan de chiffres	10.19 (1.96)	6	15
Capacités sensorimotrices			
<i>Tapping</i> (total)	44.51 (8.61)	29	68
Intégration visuo-motrice	19.85 (3.06)	14	26

4.2 Effet de l'Allographe de production sur la fluence de production graphomotrice à la tâche graphomotrice

La fluence de production graphomotrice est significativement plus faible dans la condition Maj ($M = 36$ lettres/minute; $ÉT = 10$) que dans la condition Min ($M = 52$ lettres/minute; $ÉT = 13$; $t(117) = 14.64$, $p < .001$, $\eta^2 = .65$) à la tâche du prénom.

4.3 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale

Les performances orthographiques des élèves à la tâche expérimentale sont regroupées dans le tableau 5.

Tableau 5

Statistiques descriptives pour le pourcentage de mots erronés, en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules), de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 1 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum

Pourcentage de mots erronés (%)												
Fréquents							Non-fréquents					
Consistants			Inconsistants				Consistants			Inconsistants		
Allographe	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max
Minuscules	36.27 (20.91)	0	100	60.51 (23.16)	0	100	49.32 (25.31)	0	100	86.10 (15.36)	20	100
Majuscules	44.41 (23.99)	0	100	64.58 (19.46)	20	100	49.66 (25.18)	0	100	86.10 (16.64)	20	100

4.3.1 Effet de la Fréquence des mots

L'effet principal du facteur Fréquence est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,116) = 192.12$, $CM = 6.27$, $p < .001$, $\eta^2 = .62$) et marginal pour l'analyse par items ($F_2(1,32) = 3.92$, $CM = 0.53$, $p < .10$, $\eta^2 = .11$). Nous retiendrons ici que le pourcentage de mots erronés est plus important dans la condition NF ($M = 67.80$ %; $ÉT = 12.27$) que dans la condition F ($M = 51.44$ %; $ÉT = 16.00$).

4.3.2 Effet de la Consistance des mots

L'effet principal du facteur Consistance est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,116) = 465.49$, $CM = 20.38$, $p < .001$, $\eta^2 = .80$; $F_2(1,32) = 12.88$, $CM = 1.73$, $p < .002$, $\eta^2 = .29$). Le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé dans la condition NC ($M = 74.32$ %; $ÉT = 12.05$) que dans la condition C ($M = 44.92$ %; $ÉT = 17.01$).

4.3.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Fréquence X Consistance est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,116) = 63.85$, $CM = 1.23$, $p < .001$, $\eta^2 = .36$), mais non pour l'analyse par items ($F_2(1,32) = 0.77$, $CM = 0.10$, $p > .38$, $\eta^2 = .02$). Nous retiendrons que l'effet du facteur Fréquence est plus important dans la condition NC ($t(117) = -15.75$, p

$< .001$, $\eta^2 = .68$; différence de 23.56 %) que dans la condition C ($t(117) = -6.28$, $p < .001$, $\eta^2 = .25$; différence de 9.15 %). La figure 7 présente le pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence et de la Consistance des mots.

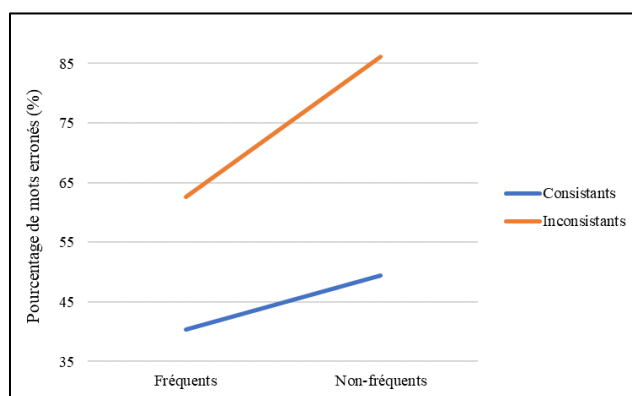


Figure 7 : Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 1

4.3.4 Effet de l'Allographe de production

L'effet principal du facteur Allographe est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,116) = 7.80$, $CM = 0.19$, $p < .007$, $\eta^2 = .06$; $F_2(1,32) = 7.89$, $CM = 0.02$, $p < .009$, $\eta^2 = .20$). Le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé dans la condition Maj ($M = 61.19$ %; $ÉT = 14.23$) que dans la condition Min ($M = 58.05$ %; $ÉT = 13.88$).

4.3.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Fréquence est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,116) = 8.19$, $CM = 0.22$, $p < .006$, $\eta^2 = .07$; $F_2(1,32) = 8.73$, $CM = 0.02$, $p < .007$, $\eta^2 = .21$). L'effet du facteur Allographe est significatif dans la condition F ($t(117) = -4.09$, $p < .001$, $\eta^2 = .12$; différence de 6.10 %), mais non dans la condition NF ($t(117) = -0.11$, $p > .91$, $\eta^2 = .01$; différence de 0.17 %). La figure 8 présente le pourcentage de mots erronés en fonction de l'Allographe de production et de la Fréquence des mots.

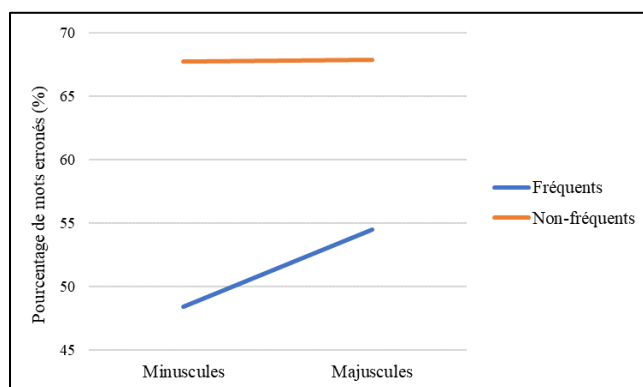


Figure 8 : Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Fréquence des mots (Fréquents/Non-fréquents) à l'Étude 1

4.3.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,116) = 0.13$, $CM = 0.004$, $p > .72$, $\eta^2 = .001$; $F_2(1,32) = 0.19$, $CM = 0.0004$, $p > .66$, $\eta^2 = .006$).

4.3.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction double entre les facteurs Allographe X Fréquence X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,116) = 2.53$, $CM = 0.06$, $p > .11$, $\eta^2 = .02$; $F_2(1,32) = 2.40$, $CM = 0.005$, $p > .13$, $\eta^2 = .07$).

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'objectif de cette première étude était de déterminer, dans le cadre de la théorie capacitaire, si le coût cognitif de la programmation graphomotrice a un effet sur le nombre d'erreurs orthographiques produites lors de l'écriture de mots isolés, ce d'autant plus que les ressources cognitives mobilisées par les traitements orthographiques sont élevées. Pour préciser la nature de cette relation, une tâche de production écrite de 40 mots sous dictée a été administrée à des élèves de troisième année. Nous avons fait varier a) le coût cognitif de la programmation graphomotrice, en manipulant l'Allographe de production (minuscules

cursives vs majuscules scriptes), et b) la complexité des traitements orthographiques, en manipulant la Fréquence (fréquents vs non-fréquents) et la Consistance (consistants vs inconsistants) des mots.

La tâche du prénom a été conçue pour réaliser un contrôle méthodologique, visant à valider l'effet de l'Allographe de production sur la programmation graphomotrice, en dehors du dispositif expérimental. Nous avons ainsi demandé aux élèves de rappeler par écrit, tant en minuscules qu'en majuscules, les lettres de leur prénom en 30 secondes. La fluence de production graphomotrice (Olive et al., 2007, 2009), une mesure régulièrement utilisée pour évaluer la mise en place progressive des mécanismes d'automatisation (cf. Annexe A), a été calculée. Les résultats obtenus à cette tâche montrent que la fluence de production graphomotrice est significativement plus faible quand les élèves produisent leur prénom en recourant aux lettres majuscules qu'aux lettres minuscules.

Pour la tâche expérimentale, les résultats montrent que le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé lorsque les élèves ont à produire a) des mots non-fréquents que des mots fréquents (F_1), et b) des mots inconsistants que des mots consistants (F_1/F_2). L'effet de la Fréquence est d'ailleurs plus marqué pour les mots inconsistants que pour les mots consistants (F_1). De plus, le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé quand les élèves ont à produire des mots en lettres majuscules qu'en lettres minuscules (F_1/F_2). L'effet de l'Allographe de production interagit avec celui de la Fréquence (F_1/F_2) : le pourcentage de mots erronés est plus élevé quand des mots sont produits en lettres majuscules qu'en lettres minuscules, mais uniquement pour des mots fréquents.

5.1 Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice : validation du facteur Allographe de production à la tâche graphomotrice

La tâche du prénom, qui fait appel aux lettres les plus familières pour les élèves, présente deux avantages : a) elle ne mobilise pas de calcul orthographique, et b) elle est produite régulièrement depuis la maternelle (Ministère de l'éducation nationale, 2015), ce qui entraîne une automatisation plus précoce de ses programmes moteurs (cf. Pontart et al., 2013). Cette tâche ne représente donc pas une activité exigeante pour des élèves de troisième

année, aussi bien sur le plan de l'orthographe que sur celui de la graphomotricité, ce qui permet à cette chaîne de lettres d'être écrite rapidement et avec un faible coût cognitif.

Or, la fluence de production graphomotrice chute de façon significative – de l'ordre de 16 lettres par minute – lorsque les élèves produisent leur prénom en recourant aux lettres majuscules scriptes comparativement aux lettres minuscules cursives. Cet effet de moyenne taille ne peut pas être attribué à la mise en œuvre de traitements orthographiques, mais uniquement à celle de traitements graphomoteurs dont il reste à déterminer la nature exacte. En ce sens, nos résultats rejoignent ceux d'autres études menées auprès d'adultes (Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002), ayant montré que l'utilisation de lettres majuscules diminuait le nombre de mots produits par minute dans une tâche de copie tout en augmentant les temps de réaction à une tâche secondaire (i.e. réagir le plus vite possible à un signal sonore). Cette baisse de performance résulte, selon Olive et al. (2007), d'un « tracé peu, voire pas du tout, automatisé » (p. 71) en lettres majuscules, mobilisant une grande part des ressources cognitives disponibles en mémoire de travail.

Plus spécifiquement, trois sources de difficultés nous semblent envisageables afin d'expliquer la réduction de la fluence de production graphomotrice avec l'emploi de lettres majuscules : a) leur fréquence d'utilisation plus faible en comparaison aux lettres minuscules, ce qui rallonge sans doute le temps d'activation (Anderson, 1983) des programmes moteurs stockés en mémoire à long terme (i.e. accès ralenti aux programmes moteurs); b) l'inhibition lettre après lettre des programmes moteurs les plus usuels – en minuscules cursives – qui sont probablement activés pendant et tout au long de la tâche (i.e. interférence entre deux programmes moteurs plus ou moins procéduralisés); et c) l'enchaînement discontinu propre aux lettres majuscules scriptes, obligeant une programmation et une exécution au pas-à-pas (Lambert et Espéret, 2002) inhabituelles pour des scripteurs qui ont été soumis depuis leur entrée à l'école à un enseignement systématique de l'écriture cursive (i.e. *déchunking* des unités graphomotrices).

Bien qu'il soit impossible de dissocier la part de chacune de ces difficultés au cours de la production écrite, les résultats que nous avons obtenus à la tâche du prénom confirment

l'intérêt de manipuler l'allographe de production pour faire varier le coût cognitif de la programmation graphomotrice. La validité de notre démarche méthodologique est ainsi attestée.

5.2 Variation de la complexité des traitements orthographiques à la tâche expérimentale

Comme anticipé, les mots non-fréquents sont moins bien orthographiés que les mots fréquents (Delattre et al., 2006; Gonzalez-Martin et al., 2017; Sovik et al., 1994, 1996), ce d'autant plus qu'ils sont inconsistants (Afonso et al., 2015; Bonin et al., 2008; Delattre et al., 2006; Palmis et al., 2019; Planton et al., 2017; Sovik et al., 1994, 1996). Ainsi, le pourcentage de mots erronés apparaît d'autant plus important que les traitements orthographiques sont complexes et probablement coûteux. De fait, l'absence ou la non-spécification des représentations orthographiques inscrites dans le lexique mental oblige les élèves à calculer l'orthographe des mots en recourant à un processus contrôlé : la médiation phonologique. Sa mise en œuvre est reconnue pour mobiliser plus de ressources cognitives que la voie lexicale, réputée automatisée (Bonin, 2003; Bonin et Delattre, 2010; Ferrand et al., 2018; Schelstraete et Maillart, 2004). Autrement dit, l'orthographe des mots non-fréquents doit être reconstituée – au moins partiellement – en mémoire de travail, à défaut de pouvoir être récupérée directement en mémoire à long terme. Les élèves sont toutefois condamnés à des erreurs de *régularisation* en présence de mots inconsistants, puisque ces derniers ne respectent pas les règles de conversion phonème-graphème les plus fréquentes de la langue française.

5.3 Relations entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques à la tâche expérimentale

Les résultats de cette étude montrent que les élèves produisent plus de mots erronés, indépendamment de leurs caractéristiques lexicales et sous-lexicales, lorsqu'ils les écrivent en majuscules qu'en minuscules. Comme nous l'avons abordé précédemment, produire des mots en majuscules sollicite plus fortement les fonctions exécutives des élèves : ils doivent inhiber sélectivement les programmes moteurs concurrents (i.e. *dépréparer* le mouvement anticipé en minuscules), tout en résistant probablement à l'habitude voire au désir de joindre les lettres entre elles (i.e. écriture scripte vs cursive). Ces traitements interférents, qui saturant

plus ou moins la capacité limitée du réservoir attentionnel, pourraient agir comme une tâche ajoutée au cours de la production écrite d'un mot : la gestion de cette « tâche secondaire » consommerait des ressources cognitives qui feraient alors défaut à la tâche principale (i.e. orthographier des mots sous dictée) qui doit être réalisée simultanément (Bourdin, 1999; Favart et Olive, 2005; Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002; Piolat et Olive, 2000).

Cette hypothèse n'est cependant valide que si les élèves ne recourent qu'aux lettres majuscules lorsque la consigne l'exige, et ne les substituent pas par leur équivalent en minuscules. En effet, la théorie capacitaire prédit que la nature d'un traitement peut être modifiée en raison des exigences compétitives en allocation de ressources, un processus très coûteux pouvant être remplacé stratégiquement par un processus moins coûteux afin d'alléger la charge cognitive (McCutchen, 1998). Afin de vérifier le maintien de la tâche secondaire, nous avons compté le nombre de mots comportant une *erreur allographique* lors de la dictée (cf. Alamargot et al., 2014), soit l'insertion à tort d'au moins une lettre minuscule alors que les majuscules étaient requises. Ce cas s'est manifesté pour seulement 23 mots sur un total de 2360, ce qui représente moins de 1 % d'erreur. Ce résultat complémentaire a deux implications : a) il garantit que le coût cognitif de la tâche secondaire a été induit de façon constante tout au long de la tâche principale, et b) il confirme que les représentations allographiques des lettres majuscules sont accessibles et bien établies chez les élèves (Hanley et Peters, 1986; Patterson et Wing, 1989).

Dans cette perspective, l'accroissement du coût cognitif de la programmation graphomotrice lors de l'exécution d'allographes majuscules a probablement limité les ressources cognitives disponibles pour les traitements orthographiques, menant à une augmentation du pourcentage de mots erronés (Fayol et Miret, 2005; Schelstraete et Maillart, 2004). Autrement dit, la programmation des lettres majuscules mobilise plus de ressources cognitives que celle des lettres minuscules et cette mobilisation s'effectue au détriment de la réussite orthographique (Bourdin, 1999).

Cet effet *bottom-up*, qui est cohérent avec la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), est modulé en fonction de la complexité des traitements

orthographiques. Toutefois, notre hypothèse de recherche n'est que partiellement validée : contrairement à ce que nous avons anticipé, l'effet perturbateur de la programmation graphomotrice n'est pas d'autant plus important que les mots sont non-fréquents et inconsistants (i.e. coûteux). Cet effet est uniquement circonscrit aux mots fréquents, n'étant plus significatif quand les mots doivent être obligatoirement calculés par médiation phonologique. Ce résultat appelle différents points de discussion.

Le pourcentage de mots erronés est plus important en majuscules qu'en minuscules pour les mots fréquents strictement en raison du coût cognitif de la programmation graphomotrice. En effet, les représentations orthographiques de ces mots sont en principe récupérées par adressage en mémoire à long terme, une procédure peu consommatrice en ressources cognitives (Ferrand et al., 2018). Ainsi, les erreurs commises par les élèves ne sont pas liées à la complexité des traitements orthographiques, mais plutôt aux exigences imposées sur le plan de la graphomotricité.

Une question qui se pose ici est celle du processus impliqué dans la production orthographique qui est affecté par la limitation des capacités de maintien et de traitement de la mémoire de travail, deux fonctions en compétition pour l'attribution des ressources cognitives (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1998).

Comme nous l'avons abordé dans le cadre théorique, la production écrite d'un mot au cours d'une tâche de dictée requiert que sa représentation orthographique soit temporairement stockée dans le *buffer* graphémique, dans lequel aboutit le produit des voies lexicales et sous-lexicales, le temps que se réalisent les traitements graphomoteurs (Bonin et al., 2015). Cette mémoire tampon assure donc le maintien de la séquence des lettres avant et pendant l'exécution graphomotrice, afin qu'elles soient produites dans le bon ordre, sans réactivation du lexique et sans recours à une nouvelle application des correspondances phonème-graphème (Sausset et al., 2016). Si les ressources cognitives mobilisées par la programmation graphomotrice sont (trop) élevées, il est possible qu'une partie de l'activation qui servait à maintenir la représentation orthographique soit « désattribuée », provoquant une perte d'information en mémoire (Just et Carpenter, 1992). Dans cette perspective, il est

probable que l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice vienne a) perturber la stabilité des représentations orthographiques maintenues temporairement actives dans le *buffer* graphémique, et b) empêcher le recours à une nouvelle récupération orthographique en cas d'oubli (Pontart et al., 2013). De cette façon, nos résultats étendent ceux recueillis par Bourdin et Fayol (1994) dans une tâche de rappel sériel de mots fréquents, qui avaient montré que les performances des adultes diminuaient avec l'emploi de lettres majuscules, le coût cognitif de la programmation graphomotrice interférant avec les processus de rétention et de récupération de l'information.

Le fait que le pourcentage de mots erronés ne soit pas plus important en majuscules qu'en minuscules pour les mots non-fréquents pose question. En effet, le calcul orthographique de ces mots nécessite un traitement complexe et coûteux qui devrait avorter dans les situations où les ressources cognitives de l'élève sont dédiées aux traitements graphomoteurs. Trois pistes interprétatives peuvent être envisagées pour expliquer ce résultat qui va à l'encontre des prédictions de la théorie capacitaire :

a) Une variabilité plus ou moins importante entre les stimuli expérimentaux de chacune des listes, expliquant d'ailleurs l'absence de signification dans l'analyse par items (F_2) pour l'effet principal du facteur Fréquence et son effet d'interaction simple avec le facteur Consistance. Dans cette perspective, l'effet de l'Allographe de production pourrait ne pas ressortir de la variance introduite par les traitements orthographiques pour les mots non-fréquents.

b) Pour produire un mot sous dictée, les élèves doivent d'abord en faire une analyse acoustique ou phonétique, ce qui leur permet ensuite i) de le reconnaître auditivement (i.e. accès aux représentations phonologiques puis sémantiques en mémoire à long terme), ou ii) d'appliquer un système de conversion phonème-graphème, ce qui suppose de maintenir intacte l'intégralité de sa forme phonologique pendant le mécanisme d'assemblage (i.e. maintien d'informations verbalisables dans le *buffer* phonologique). Ces deux opérations s'effectuent en amont du *buffer* graphémique (Bonin et al., 2015; Caramazza et al., 1987; Rapp et al., 2002). Dans ce contexte, les erreurs commises par les élèves pour les mots non-

fréquents – qui pourraient alors agir comme des pseudo-mots – pourraient être provoquées par un problème qui survient avant même que la programmation du geste s'effectue. Le pourcentage de mots erronés pourrait atteindre le même plateau en minuscules et en majuscules en raison de l'incapacité des élèves à discriminer correctement ou à retenir la forme phonologique des mots non-fréquents en mémoire de travail. Ainsi, l'effet de l'Allographe de production pourrait être masqué dès lors i) que la perception et le maintien de la forme phonologique des mots non-fréquents échouent, ou ii) que le coût cognitif suscité par la médiation phonologique se révèle supérieur à ce que les élèves sont en mesure de gérer (i.e. traitements orthographiques trop complexes excédant à eux seuls les ressources du réservoir attentionnel), provoquant une surcharge cognitive indépendamment du coût des traitements graphomoteurs.

c) Le pourcentage de mots erronés pourrait ne pas être une mesure suffisamment sensible pour mettre en évidence des erreurs qui auraient deux origines possibles. En effet, cette variable globale ne tient pas compte du nombre d'erreurs commises par les élèves au sein de chaque mot : elle réagit de la même manière si un élève fait 1 erreur ou s'il en commet 10. Or, les mots non-fréquents et/ou inconsistants ont plus de risque de comporter des erreurs que les mots fréquents et/ou consistants (Bonin, 2003). Dans cette perspective, un mot fréquent produit en lettres majuscules pourrait hypothétiquement comporter une seule erreur liée au coût cognitif de la programmation graphomotrice (e.g. « ma_che » pour « marche »), alors qu'un mot non-fréquent pourrait comporter une première erreur liée à la complexité des traitements orthographiques et une seconde liée au coût cognitif de la programmation graphomotrice (e.g. « paing_in » pour « pingouin »). Les performances orthographiques ont donc été définies de manière macroscopique (Fayol et Miret, 2005) dans notre étude, ce qui pourrait empêcher la détection de l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur la réussite orthographique dans le cas des mots plus complexes.

6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992) appliquée à la production écrite (McCutchen, 1996), les résultats de cette première étude montrent qu'une

augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice, tel que suscité par l'emploi de lettres majuscules, se traduit par une augmentation du pourcentage de mots erronés dans une tâche de dictée (effet *bottom-up*). Cet effet de l'Allographe de production, vraisemblablement médiatisé par la capacité limitée du réservoir attentionnel, est uniquement significatif en présence de mots fréquents, pour lesquels les représentations orthographiques peuvent, présumément, être récupérées directement en mémoire à long terme.

7. LIMITES DE L'ÉTUDE

L'opérationnalisation du plan expérimental comporte une limite importante dans cette étude : les performances orthographiques des participants ont été comparées, en minuscules et en majuscules, à partir de mots « similaires » répartis en deux listes, mais non de mots « identiques ». Même si les listes ont été contrebalancées d'un participant à l'autre et jugées équivalentes selon un ensemble d'indicateurs linguistiques, certaines variations demeurent possibles. Afin de réduire le bruit qui pourrait résulter de la variabilité interindividuelle à l'échelle des items, nous proposons de reconduire cette étude avec un plan intra-sujets, dont le pouvoir statistique est reconnu plus puissant. Ce plan permet de comparer les performances d'un participant à lui-même. Autrement dit, chaque participant est exposé aux différentes conditions pour l'ensemble des mots (i.e. produit les mêmes mots en minuscules et en majuscules), dans un intervalle test-retest de durée suffisante. Cette méthode est la seule qui permet de différencier indéniablement deux types d'erreurs (Bonin, 2003; Schelstraete et Maillart, 2004) : a) celles qui résultent d'une augmentation du coût cognitif en mémoire de travail (i.e. *erreurs de performance*, qui se manifestent en fonction des exigences de la tâche), et b) celles qui résultent d'une méconnaissance réelle des caractéristiques orthographiques d'un mot (i.e. *erreurs de compétence*, qui persistent indépendamment des conditions de production).

QUATRIÈME CHAPITRE

ÉTUDE 2

Ce quatrième chapitre présente la deuxième étude, dont l'objectif est d'évaluer les effets d'une variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice sur a) la temporalité de l'écriture, et b) le nombre d'erreurs orthographiques – tant lexicales que graphémiques – commises lors de la production écrite de mots isolés dont le traitement orthographique est plus ou moins complexe à réaliser.

1. FONDEMENTS THÉORIQUES

Selon la théorie capacitaire, tout processus impliqué lors de la mise en œuvre d'une activité consomme des ressources dans le réservoir attentionnel, plus ou moins importantes selon leur degré d'automatisation (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996). Si le coût cognitif de ces processus outrepassé les capacités limitées de la mémoire de travail, une dégradation des performances sera observée (Fayol et Miret, 2005). Cette dégradation peut se traduire, du fait des échanges qui s'opèrent entre traitement(s) et stockage, a) par un oubli des informations maintenues temporairement en mémoire de travail, et b) par un ralentissement dans l'exécution de l'activité. En effet, les informations préalablement stockées peuvent s'estomper au cours du temps – et décliner ainsi en qualité – si les ressources sont consacrées à un épisode de traitement (Torrance et Galbraith, 2006). Si la vitesse de traitement est suffisamment rapide, ces représentations peuvent être réactivées ou reconstruites avant leur disparition complète grâce à une *refocalisation* attentionnelle (Camos et Barrouillet, 2014). Un tel rafraîchissement est toutefois entravé si les traitements captent l'attention durant des périodes prolongées. Ainsi, toute augmentation du coût cognitif d'un traitement devrait réduire la possibilité de « détourner l'attention du traitement pour rafraîchir les traces mnésiques » (*Ibid.*, p. 25), conduisant à une lenteur et à une inexactitude des performances.

2. OBJECTIF DE RECHERCHE

Notre première étude a montré qu'une augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice, suscitée par l'emploi de lettres majuscules, diminuait la fluence de production lorsque les élèves étaient appelés à produire leur prénom, un mot très fréquent pour lequel ils ont déjà automatisé l'orthographe et le tracé des lettres en minuscules cursives (Pontart et al., 2013). La réduction du débit d'écriture pourrait se justifier par un délai dans la récupération de programmes moteurs moins procéduralisés en mémoire à long terme (Anderson, 1983) et/ou par la mise en œuvre d'un contrôle inhibiteur, nécessaire afin de supprimer de manière délibérée l'activation des programmes moteurs tracés plus fréquemment (i.e. résister à la « réponse dominante », mais inappropriée à la situation). L'idée est maintenant d'attester la validité de ces arguments au cours de la production écrite de mots isolés sous dictée. Le recours aux lettres majuscules a-t-il bien une influence sur la temporalité de l'écriture (i.e. augmente-t-il la charge mentale des scripteurs)? Cette influence est-elle d'autant plus importante que les traitements orthographiques sont complexes?

Une question qui se pose ici est celle de la méthode qui permet d'extraire, de la façon la plus juste, la plus fidèle et la plus exacte possible, les caractéristiques temporelles du geste graphomoteur. Utiliser un chronomètre comme nous l'avons fait à la première étude pour la tâche du prénom se heurte à une limite importante : cet outil entraîne une surévaluation ou une sous-évaluation de la durée, qui peut se cumuler pour chaque mot, provenant du temps de réaction de l'expérimentateur au démarrage et à l'arrêt du chronomètre. Les durées sont ainsi susceptibles de varier tant sur le plan inter-individuel (entre deux expérimentateurs) que sur le plan intra-individuel (entre deux mots). Afin d'atténuer ces erreurs aléatoires, nous proposons d'enregistrer directement l'*output* de la production écrite par le biais d'une tablette graphique reliée à un ordinateur. Cette méthode, qui a été préconisée dans de nombreuses études menées auprès d'élèves du primaire (cf. Afonso et al., 2017; Alamargot et al., 2014; Barrientos, 2016; Gonzalez-Martin et al., 2017; Kandel et Perret, 2015; Pontart et al., 2013; Sovik et al., 1994; Suarez-Coalla et al., 2018), permet d'enregistrer avec une précision accrue – indépendamment de la *réactivité* de l'expérimentateur – les mouvements d'écriture, grâce à l'utilisation d'un stylo numérique sensible à la pression exercée sur la surface de la tablette.

L'activité graphomotrice des scripteurs peut alors être analysée par le logiciel *Eye and Pen*© (Alamargot et al., 2006; Caporossi et Alamargot, 2014; Chesnet et Alamargot, 2005). Ce dernier permet de calculer, en analysant le signal issu de la tablette graphique, la durée de production pour chaque mot (qui inclut des périodes de mouvement et de pauses), une mesure plus pertinente que celle de la fluence de production quand la tâche est effectuée sans limites de temps (Pontart et al., 2013).

Comme nous l'avons soulevé à la fin du chapitre précédent, le pourcentage de mots erronés dans une tâche de dictée pourrait être une mesure trop globale – et de ce fait peu sensible – pour mettre en évidence les effets, sur la réussite orthographique, d'une répartition compétitive des ressources cognitives. Tenir compte du nombre d'erreurs produites au sein d'un mot pourrait s'avérer plus utile pour évaluer l'impact des augmentations de coût(s) en mémoire de travail. Il nous apparaît ainsi pertinent de compléter l'analyse lexicale des mots (i.e. réussite ou échec) par une analyse graphémique (Daigle, Ammar et Montésinos-Gelet, 2013; Plisson, Berthiaume et Daigle, 2010). Cette dernière met en relation le nombre de graphèmes attendus pour un mot et le nombre d'erreurs qu'il contient, provoquées soit par l'ajout, l'omission, l'inversion ou la substitution de graphème(s). Par exemple, une « analyse lexicale » du mot « guodrin » pour « g/ou/d/r/on » indique qu'il y a une erreur (i.e. l'élève obtient un pourcentage d'erreur lexicale de 100 %, puisque le mot ne correspond pas à la norme orthographique), alors qu'une « analyse graphémique » en relève plutôt deux (i.e. l'élève obtient un pourcentage d'erreurs graphémiques de 40 %, puisque 2 graphèmes sur 5 sont erronés).

À la lumière des éléments qui viennent d'être soulevés, l'objectif de cette deuxième étude est le suivant : déterminer si le coût cognitif de la programmation graphomotrice a un effet sur la durée de production et la réussite graphémique de mots dont le traitement est plus ou moins complexe à réaliser, selon les contraintes imposées par leur fréquence et leur consistance. L'hypothèse qui la sous-tend est la suivante : dans le cadre de la théorie capacitaire, l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice rallongera la durée de production des mots et provoquera des erreurs lexicales et graphémiques, ce

d'autant plus que les traitements orthographiques sont complexes (i.e. exigent des calculs coûteux).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Participants

Quarante-huit élèves de troisième année (CE2), dont 27 filles et 21 garçons, ont participé à cette étude ($M = 8.32$ ans; $ET = 0.29$). Ces participants ont été recrutés dans quatre écoles au sein des académies de Créteil et de Poitiers (France). L'échantillon comportait 41 droitiers et 7 gauchers, ayant tous appris l'écriture cursive dès la fin de la maternelle. Ces participants ont été retenus selon les critères d'inclusion présentés à la fin du deuxième chapitre.

3.2 Tâches

3.2.1 *Tâches d'inclusion*

Les tâches d'inclusion qui ont été réalisées par les participants sont décrites à la première étude. Afin de simplifier le codage, le « Test d'intégration visuo-motrice » du BEERY-VM (Beery et Beery, 2004) a été remplacé par le sous-test « Précision visuo-motrice » de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012). Ce dernier a été administré afin d'évaluer le contrôle de la motricité fine, les compétences oculomotrices et la vitesse graphomotrice. Les participants devaient dessiner aussi vite que possible un trait à l'intérieur d'une piste de voiture (plus large) et d'une piste de moto (plus étroite), en évitant de toucher les bords du parcours et de tourner la feuille.

3.2.2 *Tâche graphomotrice*

Les participants devaient rappeler par écrit les lettres de leur prénom et de leur nom de famille en minuscules (cursives) et en majuscules (scriptes), le plus rapidement, mais le mieux possible.

3.2.3 Tâche expérimentale

Les participants devaient produire sous dictée 40 mots variant en fréquence et en consistance, tant en lettres minuscules (cursives) qu'en lettres majuscules (scriptes), le plus rapidement, mais le mieux possible.

3.3 Matériel

Les tâches d'inclusion ont été réalisées sur papier, avec un stylo. Les stimuli utilisés dans le cadre de la première étude ont été réadministrés pour la tâche expérimentale. L'annexe D présente leurs caractéristiques linguistiques pour chaque catégorie de mots.

Les données de la tâche graphomotrice et de la tâche expérimentale ont été recueillies par un ordinateur Mac Mini (Core i5, 2.6 GHz, modèle A1347) auquel était connectée une tablette-écran Wacom Cintiq 13HD DTK-1300. Sa position était réglée par les participants afin de respecter autant que possible leur posture d'usage. Un stylo numérique Pro Pen KP-503E a été utilisé pour enregistrer les traits avec une grande sensibilité.

Un enregistrement de la cinématique de la pointe du stylo a été réalisé grâce au logiciel *Eye and Pen*© (Alamargot et al., 2006; Chesnet et Alamargot, 2005). Celui-ci enregistre en temps réel la position et l'état de la mine (appuyée ou non) sur la tablette-écran et gère l'apparition des consignes et/ou des stimuli.

Les participants ont rappelé par écrit leur prénom et leur nom de famille dans deux cases rectangulaires placées côte à côte, directement sur la tablette-écran (9.3 cm X 1.5 cm chacune). Ils ont produit les 40 mots de la tâche expérimentale les uns à la suite des autres, chacun dans une case rectangulaire retrouvée au centre de la surface (11.6 cm X 2.3 cm). Afin de contrôler la durée acoustique, chaque stimulus préalablement enregistré était dicté pendant deux secondes à travers un casque audio Sennheiser HD 202-II raccordé à l'ordinateur, offrant une bonne isolation aux bruits ambiants.

3.4 Procédure

La collecte de données a été réalisée pendant les trois premières semaines du mois de novembre 2018, par quatre expérimentateurs formés pour les besoins de l'étude.

3.4.1 *Ordre de passation des tâches*

Tous les participants ont effectué dans l'ordre, lors d'une première séance collective réalisée en classe, les tâches d'inclusion de lecture, d'orthographe et d'intelligence générale. La durée de cette première séance, prise en charge par les expérimentateurs, était d'environ 45 minutes.

Les participants ont ensuite été rencontrés individuellement afin de réaliser les tâches d'inclusion restantes, pendant une quinzaine de minutes dans un local calme et silencieux de l'école. Ils ont effectué dans l'ordre l'épreuve « Mémoire des chiffres », ainsi que les sous-tests « Tapping » et « Précision visuo-motrice ».

La tâche graphomotrice et la tâche expérimentale ont été réalisées au cours d'une troisième séance supervisée par une seule et même expérimentatrice. Leur réalisation a pris, en moyenne, 25 minutes. Comme le montre la figure 9, les participants étaient regroupés deux par deux dans un local hors de la classe afin d'accélérer le recueil des données, mais effectuaient chacun les tâches séparément, sur deux dispositifs indépendants.

Dans un premier temps, ils ont rappelé par écrit les lettres de leur prénom et de leur nom de famille en minuscules (ou en majuscules). Dans un deuxième temps, ils ont accompli la tâche expérimentale avec le même allographe de production. À l'instar de notre première étude, une définition et une représentation imagée des mots étaient mises à disposition sur demande (cf. Annexe F).

Les participants avaient pour consigne d'attendre la fin de présentation d'un mot, programmée à deux secondes pour chaque stimulus, avant de commencer à l'écrire sur la tablette. Grâce à notre dispositif d'affichage et d'enregistrement automatique, un écran noir

apparaissait sur la tablette lorsqu'un mot était entendu dans le casque audio, ce qui signifiait aux participants d'écouter attentivement, alors qu'un écran blanc, comprenant une case rectangulaire au centre, s'affichait à la fin de l'intervalle de temps. Ce signal visuel invitait les participants, dès qu'ils étaient prêts, à écrire le mot qui venait d'être dicté.

Comme indiqué dans le tableau 6, les participants ont été rencontrés par la même expérimentatrice à nouveau, pour une quatrième et dernière séance, 5 à 7 jours suivant la précédente. Ils ont exécuté une fois de plus la tâche graphomotrice et la tâche expérimentale, mais en écrivant cette fois-ci en majuscules (ou en minuscules).

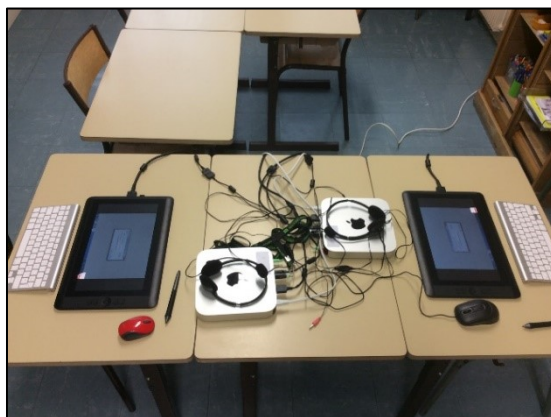


Figure 9 : Dispositif de recueil des mouvements d'écriture à l'Étude 2

Tableau 6
Ordre de passation des tâches à l'Étude 2

Séance	Durée	Tâches
1. Collective	45 minutes	1. La pipe et le rat 2. Test de niveau orthographique 3. Matrices progressives de Raven
2. Individuelle	15 minutes	1. Mémoire des chiffres 2. <i>Tapping</i> 3. Précision visuo-motrice
3. Individuelle	25 minutes	1. Tâche graphomotrice (allographe A) 2. Tâche expérimentale (allographe A)
<i>Délai de 5 à 7 jours : alternance de l'allographe de production</i>		
4. Individuelle	25 minutes	1. Tâche graphomotrice (allographe B) 2. Tâche expérimentale (allographe B)

3.4.2 Contrôles méthodologiques

L'allographe de production a été contrebalancé d'une paire de participants à l'autre pour la tâche graphomotrice et la tâche expérimentale, afin de limiter les effets de rang.

Les 40 stimuli de la tâche expérimentale ont été délivrés dans un ordre aléatoire.

3.4.3 Consignes

3.4.3.1 Consigne pour la tâche graphomotrice

La consigne suivante était donnée aux participants pour la tâche graphomotrice : « À mon signal, j'aimerais que vous écriviez votre prénom dans le premier encadré et votre nom de famille dans le second. Écrivez en lettres minuscules, le plus vite, mais le mieux possible. Si vous faites une erreur, vous pouvez faire un trait et recommencer. Lorsque vous aurez fini, appuyez sur la zone *fin* de la tablette avec votre stylo ». La même consigne orale était donnée dans le cas de l'allographe majuscule, avec le changement de terme adéquat au sein de celle-ci.

Un rappel concernant l'allographe était fait autant de fois que nécessaire (entre deux lettres) si un élève cessait d'écrire en lettres minuscules (ou en majuscules) au cours de la production, par le biais d'une affiche présentée en silence par l'expérimentatrice (cf. Annexe G).

Lorsque les participants appuyaient sur la zone *fin*, la consigne de la tâche expérimentale s'affichait sur la tablette. L'expérimentatrice la lisait à haute voix, lorsque les deux participants avaient terminé la tâche graphomotrice.

3.4.3.2 Consigne pour la tâche expérimentale

Pour la tâche expérimentale, la consigne était la suivante : « Je vais maintenant vous demander d'écrire 40 mots sur la tablette. Je vais d'abord vous les nommer un à un : si vous ne savez pas ce qu'un mot signifie, dites-le-moi et je vous donnerai sa définition ou vous

montrera une image qui le représente [...]. Comme vous pouvez le voir, certains mots sont faciles alors que d'autres sont plus difficiles. Si vous ne savez pas comment les écrire correctement, faites de votre mieux, avec vos meilleures idées. La procédure est simple : vous allez d'abord entendre un mot dans votre casque audio. Vous devrez être bien vigilants tout au long de cette activité, car vous n'entendrez le mot qu'à une seule reprise; il est donc impossible de le répéter. Quand vous aurez fini d'entendre le mot, vous verrez un écran blanc sur la tablette, avec une case au centre. Lorsque vous serez prêts, vous devrez y écrire le mot que vous aurez entendu le plus vite, mais le mieux possible. Si vous faites une erreur, vous pouvez faire un trait et recommencer. Lorsque vous aurez fini d'écrire le mot, appuyez sur la zone *fin* de la tablette avec votre stylo. Vous entendrez automatiquement un autre mot dans votre casque audio, et vous devrez, comme vous l'aurez fait plus tôt, l'écouter attentivement avant de l'écrire dans la case appropriée ».

Un item d'entraînement, soit le mot « poisson », permettait aux participants, avant le début de la tâche expérimentale, de se familiariser avec la procédure d'écoute et de transcription et à l'expérimentatrice d'intervenir en cas de besoin.

Un rappel concernant l'allographe était fait au moyen d'une affiche (cf. Annexe G) à la fin de chaque mot, dans le cas où un participant cessait d'écrire en lettres minuscules (ou en majuscules) en cours de production.

3.5 Variables mesurées

3.5.1 Mesures pour les tâches d'inclusion

Les mesures considérées pour les tâches d'inclusion sont les mêmes que celles de la première étude. Une note étalonnée composite a été calculée pour le sous-test « Précision visuo-motrice », en raison des contraintes de la tâche. Ce score tient compte, en fonction de l'âge des participants, de la note étalonnée pour la durée d'exécution des deux circuits (i.e. voiture et moto), ainsi que du rang percentile pour le nombre d'erreurs, soit le nombre total de segments où les traits ont franchi les limites extérieures du parcours.

3.5.2 *Mesure pour la tâche graphomotrice*

Seuls les prénoms des élèves ont été analysés. La durée de production par lettre (ms), qui correspond au rapport entre la durée totale de production et le nombre total de lettres produites, a été calculée. Cette variable inclut à la fois a) les moments où le crayon est en mouvement, ce qui renvoie à l'exécution graphomotrice à proprement parler, et b) les moments où le crayon est en pause, ce qui peut témoigner du temps nécessaire au rappel ou à la programmation des allographes. Les durées de la première et de la dernière pause levées ont été supprimées des analyses.

3.5.3 *Mesures pour la tâche expérimentale*

Le pourcentage de mots erronés (%) a été calculé pour la tâche expérimentale, ce qui correspond au nombre de mots erronés divisé par le nombre total de mots produits. Un mot a été jugé erroné dès qu'il s'écartait de la norme orthographique (cf. Étude 1).

Le pourcentage d'erreurs graphémiques (%) a également été calculé selon la formule suivante (adaptée de Daigle et al., 2013), tenant compte du nombre d'erreurs commises par les participants au sein d'un mot :

$$\left(\frac{\text{Nombre d'erreurs}}{\text{Nombre de graphèmes attendus}} \right) \times 100$$

Par exemple : « assiète » pour « a/ss/i/e/tt/e » comporte 2 erreurs (i.e. substitutions d'un graphème). Le pourcentage d'erreurs graphémiques est : $(2 \div 6) \times 100 = 33$.

Ce résultat signifie que le mot produit contient 33 % d'erreurs (i.e. il correspond à 67 % de la forme attendue); « lou_dere » pour « l/ou/r/d/eu/r » contient 3 erreurs (i.e. omission, substitution et ajout d'un graphème). Le pourcentage d'erreurs graphémiques est : $(3 \div 6) \times 100 = 50$.

La durée de production par lettre (ms) a été calculée comme à la tâche graphomotrice, pour l'ensemble des mots produits – qu'ils soient réussis ou non (cf. Pontart et al., 2013). Cette mesure correspond au temps écoulé entre le premier et le dernier pixel divisé par le

nombre de lettres produites, ce qui exclut donc la latence et la dernière pause nécessaire pour appuyer sur la zone *fin* sur la tablette.

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'hypothèse expérimentale de cette étude était la suivante : la durée de production par lettre, le pourcentage de mots erronés et le pourcentage d'erreurs graphémiques à la tâche de dictée augmenteront lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules, ce d'autant plus que les mots sont non-fréquents et inconsistants.

Trois analyses de variance à mesures répétées (ANOVA) comportant trois facteurs intra-sujets ont été réalisées, avec les participants (plan F_1) et les items (plan F_2) comme facteurs aléatoires, afin de vérifier les effets de l'Allographe de production (Min/Maj), de la Fréquence (F/NF) et de la Consistance (C/NC) des mots sur a) la durée de production par lettre, b) le pourcentage de mots erronés, et c) le pourcentage d'erreurs graphémiques.

Un test de Student a été effectué afin de vérifier l'effet de l'Allographe de production (Min/Maj) sur la durée de production par lettre à la tâche graphomotrice (à titre de précaution méthodologique).

4.1 Statistiques descriptives des tâches d'inclusion

Les scores bruts des participants à l'ensemble des tâches d'inclusion sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7
Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 2 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum

	<i>M (ÉT)</i>	Min	Max
Intelligence générale			
Matrices de Raven	5.69 (2.67)	0	10
Compétences en lecture			
Décodage	78.10 (28.38)	25	147
Compréhension lexicale	32.83 (11.82)	9	56
Compétences en orthographe			
Lexicale	9.35 (2.25)	6	14
Grammaticale	8.40 (2.51)	4	15
Total	17.75 (3.40)	11	25
Capacités mémorielles			
Empan de chiffres	10.88 (2.15)	7	16
Capacités sensorimotrices			
<i>Tapping</i> (total)	45.24 (8.93)	26	68
Précision visuo-motrice	9.19 (3.39)	4	16

4.2 Effet de l'Allographe de production sur la durée de production par lettre à la tâche graphomotrice

La durée de production par lettre est significativement plus élevée dans la condition Maj ($M = 1771$ ms/lettre; $ÉT = 616$) que dans la condition Min ($M = 1291$ ms/lettre; $ÉT = 512$; $t(47) = -4.80$, $p < .001$, $\eta^2 = .33$) à la tâche du prénom.

4.3 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur la durée de production par lettre à la tâche expérimentale

Les performances orthographiques des élèves à la tâche expérimentale sont regroupées dans le tableau 8.

Tableau 8

Statistiques descriptives pour les mesures orthographiques, en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules), de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 2 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum

Allographe	Fréquents						Non-fréquents					
	Consistants			Inconsistants			Consistants			Inconsistants		
	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max
Durée de production (ms/lettre)												
Minuscules	1195 (293)	790	1979	1322 (404)	741	2421	1250 (416)	748	2747	1393 (483)	755	3773
Majuscules	2156 (700)	1105	4282	2243 (758)	1291	4687	2094 (656)	1239	3772	2281 (701)	1377	4234
Pourcentage de mots erronés (%)												
Minuscules	32.50 (19.30)	0	70	61.46 (19.46)	10	90	46.25 (17.70)	10	80	80.21 (12.11)	50	100
Majuscules	42.50 (21.68)	0	90	68.13 (18.75)	30	100	50.21 (18.16)	10	90	83.33 (12.60)	40	100
Pourcentage d'erreurs graphémiques (%)												
Minuscules	11.69 (8.28)	0	33	17.83 (7.31)	2	39	13.33 (5.89)	2	26	25.77 (7.39)	11	40
Majuscules	12.96 (7.74)	0	30	20.13 (8.44)	5	41	14.60 (5.56)	2	26	28.71 (7.76)	9	44

4.3.1 Effet de la Fréquence des mots

L'effet principal du facteur Fréquence n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 1.22$, $CM = 62603$, $p > .27$, $\eta^2 = .03$; $F_2(1,36) = 0.16$, $CM = 13066$, $p > .68$, $\eta^2 = .01$).

4.3.2 Effet de la Consistance des mots

L'effet principal du facteur Consistance est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 27.18$, $CM = 1772489$, $p < .001$, $\eta^2 = .37$; $F_2(1,36) = 4.65$, $CM = 369398$, $p < .04$, $\eta^2 = .11$). La durée de production par lettre est significativement plus élevée dans la condition NC ($M = 1810$ ms/lettre; $\acute{E}T = 510$) que dans la condition C ($M = 1674$ ms/lettre; $\acute{E}T = 443$).

4.3.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Fréquence X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 2.20$, $CM = 82808$, $p > .14$, $\eta^2 = .05$; $F_2(1,36) = 0.22$, $CM = 17271$, $p > .63$, $\eta^2 = .01$).

4.3.4 Effet de l'Allographe de production

L'effet principal du facteur Allographe est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 135.02$, $CM = 78448216$, $p < .001$, $\eta^2 = .74$; $F_2(1,36) = 936.21$, $CM = 16341751$, $p < .001$, $\eta^2 = .96$). La durée de production par lettre est significativement plus élevée dans la condition Maj ($M = 2194$ ms/lettre; $\acute{E}T = 672$) que dans la condition Min ($M = 1290$ ms/lettre; $\acute{E}T = 366$).

4.3.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Fréquence n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 2.68$, $CM = 134513$, $p > .70$, $\eta^2 = .05$; $F_2(1,36) = 1.61$, $CM = 28033$, $p > .21$, $\eta^2 = .04$).

4.3.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 0.002$, $CM = 99$, $p > .96$, $\eta^2 = .00$; $F_2(1,36) = 0.001$, $CM = 21$, $p > .97$, $\eta^2 = .00$).

4.3.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction double entre les facteurs Allographe X Fréquence X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 1.19$, $CM = 42525$, $p > .28$, $\eta^2 = .03$; $F_2(1,36) = 0.50$, $CM = 8755$, $p > .48$, $\eta^2 = .01$).

4.4 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale

4.4.1 Effet de la Fréquence des mots

L'effet principal du facteur Fréquence est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 56.33$, $CM = 1.84$, $p < .001$, $\eta^2 = .54$) et marginal pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 2.94$, $CM = 0.38$, $p < .10$, $\eta^2 = .08$). Nous retiendrons ici que le pourcentage de mots erronés est plus élevé dans la condition NF ($M = 65.00$ %; $\acute{E}T = 10.71$) que dans la condition F ($M = 51.15$ %; $\acute{E}T = 17.41$).

4.4.2 Effet de la Consistance des mots

L'effet principal du facteur Consistance est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 291.24$, $CM = 8.88$, $p < .001$, $\eta^2 = .86$; $F_2(1,36) = 14.15$, $CM = 1.85$, $p < .002$, $\eta^2 = .28$). Le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé dans la condition NC ($M = 73.28$ %; $\acute{E}T = 12.01$) que dans la condition C ($M = 42.86$ %; $\acute{E}T = 16.37$).

4.4.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Fréquence X Consistance est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 5.24$, $CM = 0.09$, $p < .02$, $\eta^2 = .10$), mais non pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 0.15$, $CM = 0.02$, $p > .70$, $\eta^2 = .004$). Nous retiendrons que l'effet du facteur Fréquence est plus important dans la condition NC ($t(47) = 6.86$, $p < .001$, $\eta^2 = .50$; différence de 16.98 %) que dans la condition C ($t(47) = 5.11$, $p < .001$, $\eta^2 = .36$; différence de 10.73 %). La figure 10 présente le pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence et de la Consistance des mots.

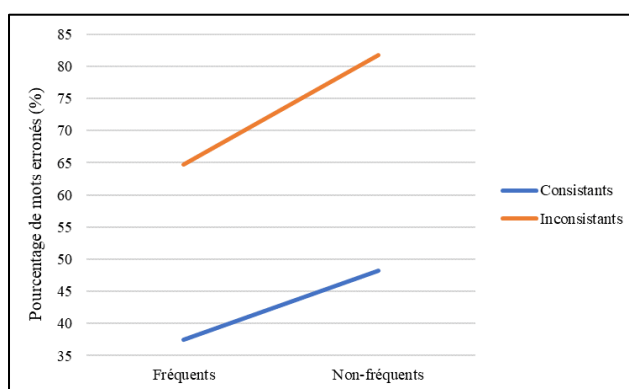


Figure 10 : Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 2

4.4.4 Effet de l'Allographe de production

L'effet principal du facteur Allographe est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 25.39$, $CM = 0.34$, $p < .001$, $\eta^2 = .35$; $F_2(1,36) = 19.35$, $CM = 0.07$, $p < .001$, $\eta^2 = .35$). Le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé dans la condition Maj ($M = 61.04$ %; $ÉT = 13.82$) que dans la condition Min ($M = 55.10$ %; $ÉT = 13.36$).

4.4.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Fréquence est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 7.00$, $CM = 0.06$, $p < .02$, $\eta^2 = .13$) et marginal pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 3.15$, $CM = 0.01$, $p < .10$, $\eta^2 = .08$). Nous retiendrons que l'effet du facteur Allographe est significatif dans la condition F ($t(47) = -6.24$, $p < .001$, $\eta^2 = .45$; différence de 8.33 %), mais non dans la condition NF avec ajustement de Bonferroni à .025 ($t(47) = -2.18$, $p = .034$, $\eta^2 = .09$; différence de 3.54 %). La figure 11 présente le pourcentage de mots erronés en fonction de l'Allographe de production et de la Fréquence des mots.

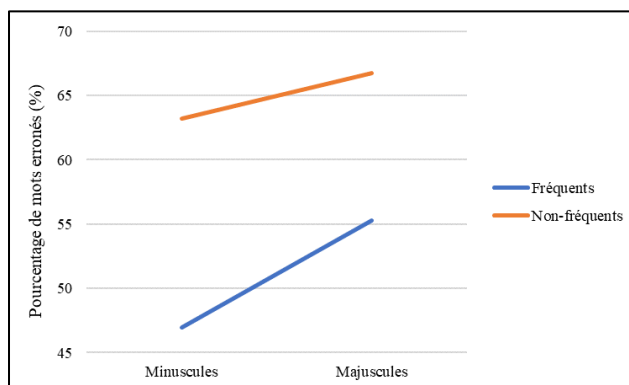


Figure 11 : Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Fréquence des mots (Fréquents/Non-fréquents) à l'Étude 2

4.4.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 2.13$, $CM = 0.01$, $p > .15$, $\eta^2 = .04$; $F_2(1,36) = 0.60$, $CM = 0.002$, $p > .44$, $\eta^2 = .02$).

4.4.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction double entre les facteurs Allographe X Fréquence X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 0.35$, $CM = 0.004$, $p > .55$, $\eta^2 = .01$; $F_2(1,36) = 0.21$, $CM = 0.001$, $p > .64$, $\eta^2 = .01$).

4.5 Effets de l'Allographe de production, de la Fréquence et de la Consistance des mots sur le pourcentage d'erreurs graphémiques à la tâche expérimentale

4.5.1 Effet de la Fréquence des mots

L'effet principal du facteur Fréquence est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 55.75$, $CM = 0.24$, $p < .001$, $\eta^2 = .54$), mais non pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 2.08$, $CM = 0.05$, $p > .15$, $\eta^2 = .06$). Nous retiendrons ici que le pourcentage d'erreurs graphémiques est plus élevé dans la condition NF ($M = 20.60$ %; $ÉT = 5.25$) que dans la condition F ($M = 15.65$ %; $ÉT = 7.12$).

4.5.2 Effet de la Consistance des mots

L'effet principal du facteur Consistance est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 267.33$, $CM = 0.95$, $p < .001$, $\eta^2 = .85$; $F_2(1,36) = 8.53$, $CM = 0.20$, $p < .007$, $\eta^2 = .19$). Le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé dans la condition NC ($M = 23.11$ %; $ÉT = 6.42$) que dans la condition C ($M = 13.15$ %; $ÉT = 5.96$).

4.5.3 Effet d'interaction entre la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Fréquence X Consistance est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 37.64$, $CM = 0.10$, $p < .001$, $\eta^2 = .44$), mais non pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 0.93$, $CM = 0.02$, $p > .34$, $\eta^2 = .03$). Nous retiendrons que l'effet du facteur Fréquence est significatif dans la condition NC ($t(47) = 9.06$, $p < .001$, $\eta^2 = .64$; différence de 8.26 %), mais non dans la condition C avec ajustement de Bonferroni à .025 ($t(47) = 2.07$, $p = .04$, $\eta^2 = .08$; différence de 1.65 %). La figure 12 présente le pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction de la Fréquence et de la Consistance des mots.

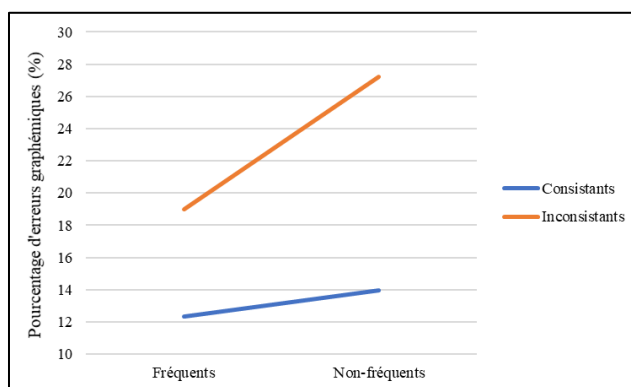


Figure 12 : Évolution du pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction de la Fréquence (Fréquents/Non-fréquents) et de la Consistance (Consistants/Inconsistants) des mots à l'Étude 2

4.5.4 Effet de l'Allographe de production

L'effet principal du facteur Allographe est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,47) = 21.47$, $CM = 0.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .31$; $F_2(1,36) = 25.93$, $CM = 0.01$, $p < .001$, $\eta^2 = .42$). Le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé dans la condition Maj ($M = 19.10$ %; $ÉT = 6.05$) que dans la condition Min ($M = 17.16$ %; $ÉT = 5.95$).

4.5.5 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Fréquence n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 0.23$, $CM = 0.00$, $p > .63$, $\eta^2 = .005$; $F_2(1,36) = 0.11$, $CM = 0.00$, $p > .74$, $\eta^2 = .003$).

4.5.6 Effet d'interaction entre l'Allographe de production et la Consistance des mots

L'effet d'interaction simple entre les facteurs Allographe X Consistance est significatif pour l'analyse par participants ($F_1(1,47) = 4.24$, $CM = 0.004$, $p < .04$, $\eta^2 = .08$) et marginal pour l'analyse par items ($F_2(1,36) = 3.29$, $CM = 0.001$, $p < .10$, $\eta^2 = .08$). Nous retiendrons que l'effet du facteur Allographe est plus important dans la condition NC ($t(47) = 4.67$, $p < .001$, $\eta^2 = .32$; différence de 2.62 %) que dans la condition C ($t(47) = 2.53$, $p < .01$, $\eta^2 = .09$; différence de 1.12 %).

.02, $\eta^2 = .12$; différence de 1.27 %). La figure 13 présente le pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction de l'Allographe de production et de la Consistance des mots.

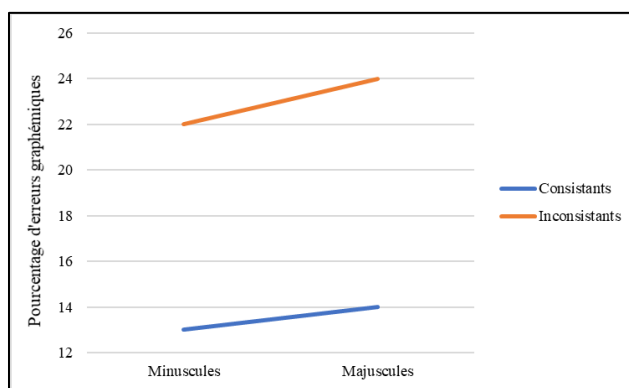


Figure 13 : Évolution du pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules) et de la Consistance des mots (Consistants/Inconsistants) à l'Étude 2

4.5.7 Effet d'interaction entre l'Allographe de production, la Fréquence et la Consistance des mots

L'effet d'interaction double entre les facteurs Allographe X Fréquence X Consistance n'est pas significatif ($F_1(1,47) = 0.13$, $CM = 0.00$, $p > .71$, $\eta^2 = .003$; $F_2(1,36) = 0.15$, $CM = 0.00$, $p > .69$, $\eta^2 = .004$).

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'objectif de cette deuxième étude était de déterminer, dans le cadre de la théorie capacitaire, si le coût cognitif de la programmation graphomotrice a un effet sur la durée de production et le nombre d'erreurs orthographiques – tant lexicales que graphémiques – commises lors de l'écriture de mots isolés, ce d'autant plus que les ressources cognitives mobilisées par les traitements orthographiques sont élevées. Pour y répondre, une tâche de production écrite de 40 mots sous dictée a été réalisée par des élèves de troisième année sur une tablette graphique. À l'instar de notre première étude, nous avons fait varier a) le coût cognitif de la programmation graphomotrice, en manipulant l'Allographe de production (minuscules cursives vs majuscules scriptes), et b) la complexité des traitements

orthographiques, en manipulant la Fréquence (fréquents vs non-fréquents) et la Consistance (consistants vs inconsistants) des mots.

Les résultats montrent que la durée de production par lettre est significativement plus importante lorsque les élèves produisent a) des mots inconsistants que des mots consistants (F_1/F_2), et b) des mots en majuscules que des mots en minuscules (F_1/F_2). Tous les résultats de l'étude précédente concernant le pourcentage de mots erronés ont été répliqués : ce dernier est plus important lorsque les élèves ont à produire a) des mots non-fréquents que des mots fréquents (F_1), et b) des mots inconsistants que des mots consistants (F_1/F_2). L'effet de Fréquence est d'ailleurs plus marqué pour les mots inconsistants que pour les mots consistants (F_1). Le pourcentage de mots erronés est également plus élevé quand les élèves produisent les mots en majuscules qu'en minuscules (F_1/F_2). L'effet de l'Allographe de production interagit avec celui de la Fréquence (F_1) : le pourcentage de mots erronés est plus élevé quand les mots sont produits en majuscules qu'en minuscules, mais uniquement pour les mots fréquents. Similairement, le pourcentage d'erreurs graphémiques est plus élevé lorsque les élèves produisent a) des mots non-fréquents que des mots fréquents (F_1), et b) des mots inconsistants que des mots consistants (F_1/F_2). L'effet de Fréquence est uniquement significatif pour les mots inconsistants (F_1). Le pourcentage d'erreurs graphémiques est également supérieur quand les élèves produisent les mots en majuscules qu'en minuscules (F_1/F_2). L'effet de l'Allographe de production interagit avec celui de la Consistance (F_1) : le pourcentage d'erreurs graphémiques est plus élevé quand les mots sont produits en majuscules qu'en minuscules, ce d'autant plus qu'ils sont inconsistants.

5.1 Variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice : validation du facteur Allographe de production à la tâche graphomotrice

La durée de production par lettre est significativement plus élevée lorsque les élèves produisent leur prénom en recourant aux lettres majuscules scriptes qu'aux lettres minuscules cursives. Ce résultat confirme, à la suite de notre première étude, l'intérêt de manipuler l'allographe de production afin de faire varier le coût cognitif de la programmation graphomotrice.

Comme discuté dans le chapitre précédent, le rallongement de la durée de production en majuscules pourrait être provoqué par un accès ralenti aux programmes moteurs et/ou par la mise en œuvre d'un contrôle inhibiteur. Un bémol s'impose toutefois : l'augmentation de la durée de production en majuscules pourrait également être provoquée par une augmentation de la taille des lettres si le mouvement ne répond pas au principe d'isochronie, tributaire de la mise en place des programmes moteurs (Zesiger, 1995). Selon ce principe, qui caractérise une écriture experte (Chartrel et Vinter, 2004), la durée de mouvement est maintenue constante, quelle que soit la longueur du tracé : si la taille des lettres augmente, la vitesse d'écriture augmente (cf. Jolly et Gentaz, 2013). Comme la distance parcourue par lettre n'a pas été mesurée dans le cadre de cette étude, cette question nécessitera des recherches plus approfondies.

5.2 Variation de la complexité des traitements orthographiques à la tâche expérimentale

Cette deuxième étude montre que la durée de production par lettre est significativement plus élevée lorsque les élèves produisent des mots inconsistants que des mots consistants. Ce résultat suggère la présence d'un conflit entre les différentes graphies possibles pour un même phonème (Bonin et Delattre, 2010), qui se poursuit pendant l'écriture des mots inconsistants (cf. Afonso et al., 2015; Delattre et al., 2006; Kandel et Perret, 2015; Kandel et Valdois, 2005; Palmis et al., 2019; Planton et al., 2017; Roux et al., 2013; Suarez-Coalla et al., 2018). En revanche, l'effet de la fréquence n'est pas significatif et n'interagit pas avec celui de la consistance. Comme l'ont montré d'autres études menées auprès d'enfants et d'adultes (cf. Afonso et al., 2015; Bonin et al., 2016; Lambert et al., 2008, 2011; Suarez-Coalla et al., 2018), le traitement des mots non-fréquents pourrait être entièrement géré au cours de la période qui précède l'écriture des mots, en rallongeant donc uniquement la latence (i.e. en ne *cascadant* pas sur la durée de production). Ce délai traduirait une difficulté voire une incapacité à récupérer par adressage les représentations orthographiques emmagasinées dans le lexique mental, car absentes.

Par ailleurs, les résultats montrent que le nombre d'erreurs orthographiques – tant lexicales que graphémiques – est plus élevé pour les mots non-fréquents que pour les mots

fréquents, ce d'autant plus qu'ils sont inconsistants (Delattre et al., 2006; Gonzalez-Martin et al., 2017; Sovik et al., 1994, 1996). Ainsi, le caractère plus ou moins rare et plus ou moins *calculable* des mots, qui entraîne probablement une augmentation du coût cognitif en mémoire de travail, engendre des erreurs d'orthographe.

Comme l'indiquent les figures 10 et 12, le pourcentage de mots erronés s'élève à près de 65 % pour les mots fréquents et inconsistants, alors que le pourcentage d'erreurs graphémiques est à 19 %. Pourtant, les représentations orthographiques de ces mots sont censées pouvoir être récupérées directement en mémoire à long terme; l'effet de consistance ne devrait donc pas être significatif pour les mots fréquents, contrairement à ce qui est observé ($t(47) = 13.44, p < .001, \eta^2 = .79$; différence de 27.29 %; $t(47) = 9.51, p < .001, \eta^2 = .66$; différence de 6.66 %, respectivement).

Ces résultats laissent à penser que la procédure par adressage ne se substitue pas totalement, chez des élèves de troisième année, à celle par assemblage. Sur la base des travaux présentés dans le cadre théorique, les élèves pourraient commettre des erreurs pour les mots fréquents et inconsistants pour l'une ou l'ensemble des raisons suivantes : a) soit les représentations orthographiques de ces mots sont absentes ou sous-spécifiées (i.e. emmagasinées sous une forme incomplète) dans le lexique mental, ce qui oblige une application même partielle des correspondances phonème-graphème, b) soit les élèves ont tendance à recourir de façon préférentielle à la médiation phonologique même quand ils connaissent les mots (i.e. la stratégie mobilisée n'est pas la plus efficace), et/ou c) soit le produit de la voie sous-lexicale domine la « course » contre celui de la voie lexicale (Rapp et al., 2002), activées simultanément (i.e. une compétition s'opère entre la représentation orthographique inconsistante, mais correcte, de la voie lexicale et celle, incorrecte, issue de la voie phonologique).

5.3 Relations entre les traitements graphomoteurs et les traitements orthographiques à la tâche expérimentale

5.3.1 *Durée de production par lettre*

Les résultats de cette étude montrent que la durée de production par lettre est significativement plus élevée à la tâche de dictée lorsque les élèves recourent aux lettres majuscules comparativement aux lettres minuscules. Contrairement à l'hypothèse que nous avons formulée, cet effet de l'Allographe de production n'est pas modulé par la complexité des traitements orthographiques. Ainsi, la programmation graphomotrice mobilise davantage de ressources cognitives en majuscules, comme à la tâche du prénom, ce qui compromet le débit et/ou les pauses de l'écriture indépendamment des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots (Brun-Henin et al., 2012; Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002; Sausset et al., 2012).

5.3.2 *Pourcentage de mots erronés*

Rappelons que les mêmes mots ont été produits, dans le cadre de cette étude, en minuscules et en majuscules par l'ensemble des participants. Ainsi, l'effet principal de l'Allographe de production sur le pourcentage de mots erronés ne peut pas être imputé simplement à un « défaut de compétence », lié à une connaissance erronée de l'orthographe des mots. Il est plus vraisemblablement provoqué par à un « défaut de performance », lié à une augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice (Bonin, 2003; Schelstraete et Maillart, 2004).

Comme nous l'avons abordé dans l'introduction théorique, plus un traitement est exigeant sur le plan attentionnel (i.e. contrôlé) et plus ce traitement est lent, plus les informations stockées temporairement en mémoire de travail s'effacent (Camos et Barrouillet, 2014). Dans cette perspective, la programmation graphomotrice des lettres majuscules a) capte une part importante des ressources cognitives en mémoire de travail, et b) impose un maintien prolongé des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, qui sert de point d'ancrage aux processus périphériques, ce qui diminue en retour les capacités de rappel. De tels oublis en mémoire de travail nécessitent, afin de

réactiver les traces, une nouvelle récupération lexicale et/ou un nouveau recours à la médiation phonologique. Or, ces deux processus peuvent être réitérés uniquement si des ressources cognitives sont toujours disponibles dans le réservoir attentionnel.

Nous pouvons dès lors nous attendre, si la programmation graphomotrice des lettres majuscules capte l'attention durant une période prolongée, à une relation linéaire entre la durée de production par lettre et le pourcentage de mots erronés. De fait, une corrélation positive et significative de $r = .46$ ($n = 48$, $p < .002$) est obtenue entre ces deux mesures. Ce résultat complémentaire montre que la production d'erreurs orthographiques est liée à l'efficacité des traitements graphomoteurs sur deux niveaux : a) la durée nécessaire pour programmer les lettres et les enchaîner au sein des mots (i.e. contrainte liée au temps), et b) les ressources cognitives qui sont dévolues à ces opérations, au détriment du stockage et des mécanismes consacrés au rafraîchissement des représentations orthographiques (i.e. contrainte capacitaire).

Cette deuxième étude met en évidence, comme la première, une interaction significative entre l'Allographe de production et la Fréquence des mots : le pourcentage de mots erronés est plus important en majuscules qu'en minuscules pour les mots fréquents seulement, et ce quelle que soit leur consistance (consistants : $t(47) = 5.60$, $p < .001$, $\eta^2 = .40$; différence de 10.00 %; inconsistants : $t(47) = 3.53$, $p < .002$, $\eta^2 = .21$; différence de 6.67 %).

Ce résultat robuste, puisque répliqué sur deux échantillons différents, pointe également vers un estompage trop rapide de la trace orthographique stockée temporairement dans le *buffer* graphémique quand l'activité graphomotrice est sous le « focus attentionnel » des élèves (*Ibid.*). Une telle perturbation devrait, si elle se confirme, se manifester par une dégradation plus importante de l'encodage spatial de la séquence de graphèmes (identité, position, ordre) formant un mot, indépendamment de sa fréquence et de sa consistance. En effet, plusieurs études en neuropsychologie ont montré qu'un déficit au sein du *buffer* graphémique était susceptible de provoquer, quelle que soit sa source d'alimentation (i.e. assemblage et/ou adressage), des omissions, des substitutions, des ajouts et des permutations

de lettres (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza et al., 1987; Costa et al., 2011; Goodman et Caramazza, 1986; Wing et Baddeley, 1980, 2009).

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons réparti les mots erronés en deux sous-catégories. D'une part, les mots erronés phonologiquement plausibles, qui comportent une ou des erreur(s) qui ne transforme(nt) pas leur prononciation (i.e. erreurs de *régularisation*, qui témoignent d'une surexploitation du système de conversion phonème-graphème). Par exemple : « otruche » (1 erreur) pour « autruche » ou « kado » (2 erreurs) pour « cadeau ». D'autre part, les mots erronés phonologiquement non-plausibles, qui comportent une ou des erreur(s) qui en altère(nt) au contraire la prononciation. Par exemple : « ours_ » (1 erreur) pour « oursin » ou « chap_ro » (2 erreurs) pour « chaperon ». La valeur phonologique d'une production a été déterminée à partir de l'ouvrage de Catach (2003), qui dresse l'inventaire des graphèmes possibles pour transcrire chacun des phonèmes de la langue française.

Les résultats de cette analyse additionnelle montrent que le pourcentage de mots erronés phonologiquement non-plausibles est plus important quand les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules qu'aux lettres minuscules ($t(47) = -4.32, p < .001, \eta^2 = .28$; différence de 5.47 %), contrairement au pourcentage de mots erronés phonologiquement plausibles qui ne varie pas ($t(47) = -0.44, p > .66, \eta^2 = .004$; différence de 0.47 %). Les paragraphes littérales plus fréquentes en majuscules témoignent d'une réduction des capacités de maintien du *buffer* graphémique, résultant probablement de l'augmentation de la durée de production des mots. Comme l'atteste la figure 14, ces erreurs typiques, qui sont associées à des « glissements de plume » (i.e. *slips-of-the-pen* : Wing et Baddeley, 1980), peuvent mener à des inversions ou à des omissions de lettres ou de graphèmes quand les élèves produisent les mots en majuscules, alors que ces mêmes mots respectent la norme orthographique quand ils les produisent en minuscules.

trèfle	TERFLE
lourdeur	L ^o UR DEU
chasseur	CHSSEURF
moteur	MTEUR
poisson	POVRON
diabète	DIABE

Figure 14 : Exemples de productions orthographiques en fonction de l'Allographe de production (Minuscules/Majuscules) à l'Étude 2

5.3.3 Pourcentage d'erreurs graphémiques

Dans le cadre de la théorie capacitaire, l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice devrait diminuer la réussite orthographique, ce d'autant plus que les traitements orthographiques mobilisent eux-mêmes des ressources cognitives. Cette hypothèse n'est qu'en partie validée en tenant compte du pourcentage de mots erronés, un indicateur de la réussite lexicale, puisque l'effet perturbateur de la graphomotricité est uniquement significatif pour les mots fréquents.

Cette hypothèse est toutefois confirmée si nous considérons le nombre d'erreurs qui sont commises au sein d'un même mot : le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé lorsque les mots sont produits en recourant aux lettres majuscules, ce d'autant plus qu'ils sont inconsistants. Ce résultat confirme l'une des pistes explicatives que nous avons soulevées à la fin de la première étude quant à la *granularité* des mesures. Ainsi, l'effet *bottom-up* de la graphomotricité est modulé par la complexité des traitements orthographiques sur le plan de la réussite graphémique : la programmation graphomotrice consomme des ressources cognitives au détriment a) du maintien des

représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, et b) de leur réactivation et/ou reconstitution en cas d'oubli ou de saturation temporaire. Ces deux mécanismes sont plus coûteux – et à plus fort risque d'échouer – si des inconsistances sont à résoudre (De Partz, 2018).

6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le recours aux lettres majuscules rallonge la durée de production des mots dans une tâche de dictée indépendamment de leur fréquence et de leur consistance, ce qui entraîne par conséquent un maintien prolongé des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, où elles s'exposent aux interférences (Torrance et Galbraith, 2006). Conformément à la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), le nombre d'erreurs par mot est maximisé lorsque le coût cognitif des traitements à effectuer est élevé et excède sans doute les capacités limitées du réservoir attentionnel, soit lorsque les élèves produisent des mots inconsistants en majuscules plutôt qu'en minuscules.

7. LIMITES DE L'ÉTUDE

Cette deuxième étude comporte une limite potentielle relative au recueil des données. De fait, la tâche graphomotrice et la tâche expérimentale ont été réalisées directement sur l'écran d'une tablette graphique (au moyen d'une mine en plastique), et non sur une feuille pouvant être fixée à même la surface (avec une mine à encre). En comparant ces deux dispositifs auprès d'élèves de la deuxième année lors du rappel écrit du prénom et de l'alphabet, Alamargot et Morin (2015) ont montré que l'écriture sur un écran entraînait a) une diminution du pourcentage de lettres conformes au modèle allographique, b) une augmentation de la distance parcourue par lettre, et c) une augmentation de la durée moyenne des pauses. Dans la suite, Gerth et al. (2016b) ont montré que la copie de primitives graphiques (e.g. boucles, zigzags, escaliers) sur un écran pouvait, chez des élèves de la maternelle et de la deuxième année, a) diminuer la qualité du tracé, b) rallonger la durée de production, et c) augmenter le nombre de pics de vitesse. Ainsi, la surface particulièrement lisse d'un écran pourrait avoir perturbé le contrôle du geste graphomoteur, en modifiant le

feedback proprio-kinesthésique (cf. Guilbert et al., 2018a). Dans le cadre de notre étude, cette éventuelle altération du tracé pourrait avoir rallongé la durée de production par lettre ou accentué les erreurs d'orthographe commises par les participants. Cette question, qui concerne celle des conséquences possibles d'une perturbation de la paramétrisation, de l'exécution ou de la régulation du geste graphomoteur sur les traitements orthographiques, devra faire l'objet de futures recherches (Morin et al., 2017). Notons toutefois que le pourcentage de mots erronés est très similaire entre notre première étude (sur papier) et notre deuxième (sur écran). Cette comparaison, même si elle souffre de validité – les participants n'ayant pas été appariés d'une étude à l'autre – laisse supposer que l'effet interférent de la surface d'écriture, s'il existe réellement, n'est pas majeur. Afin d'écarter cette limite méthodologique, il nous semble néanmoins préférable, dans les suites de cette recherche doctorale, de faire écrire les participants sur un support habituel (i.e. la surface plus granuleuse d'un papier).

Les résultats de nos deux premières études montrent que l'emploi de lettres majuscules entraîne une augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice en mémoire de travail, ce qui vient interférer en retour avec le maintien de la forme orthographique des mots dans le *buffer* graphémique. Or, la manipulation de l'allographe de production pourrait avoir engendré un effet non-contrôlé susceptible d'influencer à son tour la réussite orthographique (tant lexicale que graphémique) : recourir aux lettres majuscules pourrait avoir gêné le processus de relecture orthographique.

Comme nous l'avons vu dans le cadre théorique, les caractéristiques visuo-orthographiques des mots, qui doivent être prises en compte afin d'inscrire en mémoire chacune des lettres qui les composent selon un ordre spécifique (e.g. « troupeau » plutôt que « troup »), sont utilisées en tant que repères en lecture. En effet, les mots ne sont pas déchiffrés lettre par lettre à mi-parcours de l'école primaire, mais peuvent être reconnus en tout ou partie en tant que *chunks* – dont le format varie avec l'expertise (e.g. « ch » dans « charme »). Ce processus pourrait être facilité par les parties ascendantes et descendantes des lettres (i.e. hampes et jambages), qui a) engendrent un contour propre à chaque mot, et

b) permettent de le décomposer plus facilement en ses constituants, notamment quand le recours à la médiation phonologique s'impose.

Or, ce contour disparaît lorsque les mots sont entièrement formés de majuscules. En effet, la différence entre le bas et le haut des lettres n'est plus marquée (e.g. CHARMEUR). Cette perte d'identité visuelle (i.e. le mot prend une forme rectangulaire uniforme) est d'ailleurs reconnue pour ralentir ou diminuer la précision en lecture et compromettre le processus de révision orthographique. Il est par exemple plus difficile de détecter, pour le mot « test », l'erreur d'orthographe « tes**f** » que l'erreur « tes**g** », dans laquelle une minuscule ascendante est remplacée par une minuscule descendante, en raison de la similarité spatiale des lettres scriptes « f » et « t » comparativement à la lettre « g » (Dehaene, 2007). De façon analogue, Veys et Hupet (2011) ont montré que la suppression du feedback visuel augmentait le nombre d'erreurs d'accord sujet-verbe chez des adultes, en gênant l'application d'un contrôle post-graphique.

Dans cette perspective, l'effet *bottom-up* qui a été mis de l'avant dans nos deux premières études pourrait ne pas être expliqué simplement par une augmentation du coût cognitif associé à la programmation graphomotrice, mais également par l'utilisation d'un allographe très peu familier en lecture qui empêche la détection en temps réel – et donc la correction – des écarts entre la forme produite et la forme souhaitée. Cet effet collatéral, s'il en représente un, n'explique toutefois pas à lui seul nos résultats. En effet, l'écriture du prénom, dont les lettres sont fermement ancrées en mémoire à long terme (la révision orthographique étant, *a fortiori*, inutile), est déstabilisée par l'emploi de lettres majuscules. Cette condition impose donc bien, indépendamment de la modification de l'allographe de lecture, une charge cognitive sur le plan graphomoteur.

Similairement, le recours aux lettres majuscules (scriptes) pourrait avoir modifié, contrairement aux lettres minuscules (cursives), la taille de l'unité traitée par les processus graphomoteurs (trait → ensemble de traits → lettre → ensemble de lettres) et les processus orthographiques (lettre → bigramme → trigramme → morphème → syllabe → mot entier). En effet, écrire en majuscules impose par essence un *déchunking*, qui déstructure

probablement la nature des unités sous-lexicales traitées : cette unité est vraisemblablement la lettre en majuscules scriptes, alors que des groupements de lettres plus complexes peuvent représenter l'unité de traitement en minuscules cursives, ce qui entraîne une économie cognitive (Humblot et al., 1994; Sausset et al., 2012; Zesiger et al., 1993; cf. Lambert et Espéret, 2002).

Cette limite souligne, comme la précédente, l'importance de recourir aux conditions expérimentales les plus écologiques possible afin de ne pas dénaturer les unités de traitement utilisées en lecture, en orthographe et en graphomotricité, qui sont susceptibles de changer d'un allographe à l'autre (Sausset et al., 2013). Afin d'éliminer cette variable confondante, il nous apparaît nécessaire, pour notre troisième étude, de ne recourir qu'aux lettres minuscules lors de la production écrite; autrement dit, de manipuler le coût cognitif de la graphomotricité autrement qu'en imposant les lettres majuscules.

CINQUIÈME CHAPITRE

ÉTUDE 3

Ce cinquième chapitre présente la troisième et dernière étude, qui vise deux objectifs. D'une part, mieux comprendre comment le geste graphomoteur se développe au cours du primaire. D'autre part, évaluer les effets d'une variation du coût cognitif des traitements graphomoteurs sur a) la temporalité de l'écriture, et b) le nombre d'erreurs orthographiques – tant lexicales que graphémiques – commises lors de la production écrite de mots fréquents isolés imposant une charge de maintien plus ou moins élevée au sein du *buffer* graphémique.

1. FONDEMENTS THÉORIQUES

Le développement de la graphomotricité se fait en différentes étapes, dépendantes de l'efficacité croissante des processus proactifs dans le tracé des allographes (cf. Palmis et al., 2017; Thibon et al., 2018a). Les études empiriques dont nous avons fait la revue dans le cadre théorique montrent une amélioration progressive des habiletés graphomotrices tout au long du primaire, avec une évolution plus particulièrement marquée entre la troisième et la quatrième année (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Chartrel et Vinter, 2006; Graham et al., 1998; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990; Kandel et Perret, 2014; Karlsdottir et Stefansson, 2002; Meulenbroek et Van Galen, 1986; Mojet, 1991; Thibon et al., 2018a). Selon Lambert et Espéret (2002), cette période – entre 8 et 10 ans – concorde avec la mise en place des programmes moteurs en mémoire à long terme qui seront, grâce à la pratique répétée de l'écriture, procéduralisés et automatisés. Cette automatisation progressive, au fur et à mesure de la scolarité, a deux implications : a) elle allège le coût cognitif des traitements graphomoteurs, et b) elle réduit par conséquent l'influence de la graphomotricité sur les traitements orthographiques (Abbott et al., 2010; Bosga-Stork et al., 2015; Fayol et Miret, 2005; Pontart et al., 2013; cf. Kent et Wanzek, 2016).

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Dans la plupart des études en temps réel qui se sont intéressées à la relation entre la graphomotricité et l'orthographe, les habiletés graphomotrices des élèves ont été inférées uniquement à partir de leur niveau scolaire (cf. Afonso et al., 2017; Gonzalez-Martin et al., 2017; Kandel et Perret, 2015; Suarez-Coalla et al., 2018), sans être évaluées directement, en elles-mêmes. Le premier objectif de cette étude est donc de décrire et de comparer les performances graphomotrices d'élèves francophones du primaire de niveaux scolaires différents. Afin d'examiner le développement du geste graphomoteur (i.e. efficience des traitements), il nous apparaît pertinent de sélectionner des élèves de première (CP), troisième (CE2) et cinquième (CM2) années. Ce choix repose sur les postulats suivants : a) les programmes moteurs ne sont pas encore procéduralisés chez les élèves de première année (7 ans), b) les programmes moteurs sont en cours de procéduralisation chez les élèves de troisième année (9 ans), et c) les programmes moteurs sont procéduralisés et en cours d'automatisation chez les élèves de cinquième année (11 ans). Ces trois niveaux scolaires impliquent donc différents degrés d'acquisition et de procéduralisation des programmes moteurs. Ils pourraient correspondre, selon le modèle ACT d'Anderson (1983) que nous avons décrit dans le cadre théorique, aux stades déclaratif-interprétatif, de compilation et de *tuning* (cf. Tableau 1).

Une question qui se pose ici concerne les tâches permettant d'évaluer, sur le plan développemental, l'évolution des performances graphomotrices d'un niveau scolaire à l'autre. En raison de sa pratique précoce et fréquente à l'école et ailleurs, le rappel écrit du prénom, auquel nous avons eu recours précédemment, pourrait atteindre un plateau vers la fin de l'école primaire (i.e. effet *plafond* engendré par son automatisation) et ne plus représenter une tâche suffisamment sensible pour les élèves de cinquième année. Dans d'autres études, les performances graphomotrices des élèves ont été évaluées en recourant à des tâches de copie de lettres, de mots, de phrases ou de textes (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Chartrel et Vinter, 2006; Graham et al., 1998; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990; Kandel et Perret, 2014; Karlsdottir et Stefansson, 2002; Mojet, 1991; Overvelde et Hulstijn, 2011). Ce type de tâches implique toutefois une importante dimension visuelle, puisqu'elles fournissent un

modèle aux scripteurs auquel ils peuvent se référer au besoin (Pérez et al., 2012). De nombreuses autres études ont évalué les performances graphomotrices des élèves par le biais du rappel écrit des 26 lettres de l'alphabet (Alves et Limpo, 2015; Pontart et al., 2013; Wagner et al., 2011; cf. Annexe A). Or, comme nous l'avons abordé dans la problématique, cette tâche ne sollicite pas uniquement des traitements graphomoteurs, mais mobilise également des connaissances alphabétiques et orthographiques, des capacités mémorielles et des fonctions exécutives (Alamargot et al., 2014, 2018; Barrientos, 2016; Peake et al., 2017; Pontart et al., 2013; Rodriguez et Villarroel, 2016). Afin d'évaluer plus directement la composante graphomotrice de l'écriture, nous proposons dans le cadre de cette étude de compléter l'analyse du prénom par une analyse des cinq premières lettres de l'alphabet, qui sont bien connues des élèves, mais enchaînées sans conteste moins fréquemment que celles de leur prénom. La tâche du prénom et celle de l'ABCDE impliquent ainsi différents niveaux de procéduralisation des programmes moteurs. Contrairement au rappel de l'ensemble de la chaîne alphabétique, la tâche de l'ABCDE réduit le risque de sauter une lettre (i.e. erreur d'omission) ou d'inverser l'ordre des lettres en cours de production (i.e. erreur de séquentialité), notamment pour les élèves de première année qui apprennent toujours, selon la *Progression des apprentissages*, à « nommer les lettres dans l'ordre alphabétique » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 15). La tâche de l'ABCDE permet donc, contrairement à celle plus classique de l'alphabet, a) de restreindre les exigences cognitives, mémorielles et linguistiques qui pèsent sur l'activité, afin de mieux isoler la composante graphomotrice de l'écriture, et b) d'analyser les mêmes unités produites chez l'ensemble des élèves.

Une autre question qui se pose est celle des mesures qui reflètent le plus adéquatement les habiletés graphomotrices des élèves. Ces dernières ont souvent été évaluées à l'aide d'une méthode *offline* de l'écriture, en analysant la conformité des lettres ou encore la fluence de production (Abbott et al., 2010; Graham et al., 1997; McCarney et al., 2013; Wanzek et al., 2017; cf. Annexe A). Rares sont les études développementales qui se sont intéressées aussi bien à la qualité du tracé qu'à la temporalité des traitements (i.e. caractéristiques spatio-temporelles du mouvement d'écriture). Pourtant, la maîtrise du geste graphomoteur repose sur la capacité à écrire correctement, mais aussi rapidement, ce qui suppose des changements

tant sur le plan statique que sur le plan cinétique de l'écriture. Afin d'évaluer plus précisément les performances graphomotrices des élèves, il nous apparaît nécessaire d'affiner, comparativement à notre étude précédente, les indicateurs temporels. En effet, la durée de production par lettre représente une mesure globale qui ne préfigure pas du temps passé en pause ou à écrire (cf. Alamargot et al., 2014). Ce grain d'analyse plus fin requiert à nouveau d'enregistrer les mouvements de l'écriture à l'aide d'une tablette graphique. Afin de compenser les limites soulevées à la fin de notre deuxième étude, il nous semble important sur ce point de faire écrire les élèves sur une feuille de papier apposée sur la tablette, et non directement sur sa surface, au moyen d'une mine à encre. La surface lisse d'un écran est en effet susceptible de modifier le feedback proprioceptif et kinesthésique (Alamargot et Morin, 2015; Gerth et al., 2016b; Guilbert et al., 2018a).

Les deux premières études que nous avons menées suggèrent que l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur les performances orthographiques se localise au niveau du *buffer* graphémique. Les lettres majuscules, plus coûteuses à programmer que les lettres minuscules, retirent des ressources cognitives qui doivent être dédiées au maintien des représentations orthographiques, menant ainsi à une augmentation du nombre d'erreurs. Dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), la production orthographique d'un mot devrait être d'autant plus lente et inexacte que le nombre d'informations à retenir en mémoire de travail est grand, particulièrement lorsque les ressources cognitives sont consacrées à un épisode de traitement au détriment du stockage (Camos et Barrouillet, 2014). Ainsi, le deuxième objectif de cette étude est de déterminer si le coût cognitif des traitements graphomoteurs a un effet sur le nombre d'erreurs orthographiques et le décours temporel de l'écriture, lorsque les mots nécessitent un maintien plus ou moins prolongé dans le *buffer* graphémique. Ce maintien se trouve en compétition avec les traitements graphomoteurs pour l'attribution des ressources cognitives.

Afin d'agir sur le processus de maintien, nous proposons de manipuler le nombre de lettres à stocker temporairement dans le *buffer* graphémique (Afonso et al., 2015; Bonin et al., 2015; Cossu et al., 1995; Gonzalez-Martin et al., 2017; Hulstijn et Van Galen, 1983; Sovik et al., 1994, 1996; Van der Plaats et Van Galen, 1990). En effet, plus un mot est long,

plus le maintien de l'identité et de l'ordre de ses lettres se prolonge dans le *buffer* graphémique, le temps que se réalisent les traitements graphomoteurs. Écrire un mot long est donc plus susceptible qu'un mot court d'entraîner un estompage des représentations orthographiques adressées dans le lexique mental ou assemblées par le système de conversion phonème-graphème (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza et al., 1987; Costa et al., 2011; Goodman et Caramazza, 1986; cf. De Partz, 2018).

En lien avec notre premier objectif de recherche qui se centre sur le développement du geste graphomoteur à l'école primaire, nous proposons dans cette étude de faire varier le coût cognitif des traitements graphomoteurs (programmation et exécution) en manipulant le niveau scolaire des élèves plutôt que l'allographe de production. Ce choix permet aux élèves d'écrire en lettres minuscules comme ils le font habituellement. Il présente l'avantage, comme nous l'avons précisé au terme du chapitre précédent, de correspondre à la nature même des activités qui sont proposées en classe – les élèves n'étant pas amenés, exception faite de la maternelle, à produire des mots en majuscules. De ce fait, recourir aux minuscules évite de dénaturer les unités de traitement utilisées en lecture, en orthographe et en graphomotricité (Sausset et al., 2013).

Une question qui se pose ici est celle de la tâche permettant d'évaluer, chez des élèves en début, en mi-parcours et en fin d'école primaire, l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur les performances orthographiques. Nous proposons de recourir à une tâche de rappel immédiat écrit de mots isolés (Bonin et al., 2015; Lambert et al., 2008, 2015; Sausset et al., 2012). Cette dernière est reconnue pour faciliter davantage que la dictée de mots, à laquelle nous avons déjà eu recours, l'étude du processus orthographique chez les apprentis-scripteurs (Lambert et al., 2012). Contrairement à une tâche de copie directe, qui a la particularité de mettre à la disposition des élèves une « mémoire externe » qu'ils peuvent réinspecter au besoin (Pérez et al., 2012), le rappel immédiat (copie différée) les empêche de faire des allers-retours entre leurs productions et les formes stables des mots. Ils doivent, en s'appuyant uniquement sur leur « mémoire interne », reproduire l'orthographe des mots aussitôt leur identification et leur disparition du support d'affiche. Ainsi, les formes phonologique et orthographique des mots doivent même pour un court laps de temps rester actives en mémoire

de travail, ce qui rend cette tâche pertinente pour étudier les effets d'une variation de la charge de maintien au sein du *buffer* graphémique sur la production écrite, en fonction de l'efficacité des traitements graphomoteurs. Afin de limiter le nombre d'erreurs à des fins de comparaison, il nous semble également préférable de réduire la complexité des traitements orthographiques en sélectionnant uniquement des mots fréquents, pour lesquels une récupération lexicale est probable. Ce choix se justifie par ailleurs par les résultats que nous avons obtenus lors de nos deux premières études, qui ont montré que l'effet perturbateur de la graphomotricité sur le pourcentage de mots erronés est circonscrit aux mots fréquents, indépendamment de leur consistance.

Une tâche de rappel immédiat nécessite par essence l'identification préalable d'un mot (phase d'encodage). La durée qui s'écoule entre sa reconnaissance visuelle et son rappel par écrit (phase d'exécution) est susceptible de refléter le temps nécessaire a) pour activer les représentations sémantique, phonologique et orthographique du mot en mémoire à long terme, et b) pour calculer ses correspondances graphème-phonème et phonème-graphème en mémoire de travail, notamment pour les plus jeunes élèves qui lisent de manière séquentielle même quand ils ont accès au sens d'un mot (Écalte et Magnan, 2015; Giasson, 2011; Sprenger-Charolles, Siegel, Béchennec et Serniclaes, 2003). Cette procédure d'assemblage, qui est utilisée de façon prédominante au cours des deux premières années de scolarité, est marquée par sa lenteur (Demont et Gombert, 2004). Elle est progressivement remplacée par une procédure d'adressage au fur et à mesure que le lexique mental des élèves se construit, plus rapide (Aghababian et Nazir, 2000; Huestegge, Radach, Corbic et Huestegge, 2009; Rau, Moeller et Landerl, 2014, 2015) et moins sensible que la précédente au nombre de lettres que les mots contiennent (Dehaene, 2011; Weekes, 1997). Afin de ne pas influencer les processus de lecture, il nous semble important ici de ne pas imposer la lecture à haute voix aux élèves. Même si elle permet de déterminer si les mots sont identifiés correctement, elle est susceptible de rallonger ou de complexifier les traitements en obligeant les élèves à fixer les mots jusqu'à ce que leur prononciation soit terminée (Hyöna et Olson, 1995).

En rapport avec les études que nous avons menées précédemment, l'hypothèse générale de cette troisième étude est la suivante : dans le cadre de la théorie capacitaire,

l'augmentation du coût cognitif des traitements graphomoteurs rallongera la durée d'exécution des mots et provoquera des erreurs – tant lexicales que graphémiques – ce d'autant plus que les élèves sont jeunes et que les mots sont longs (i.e. captent l'attention durant une période prolongée).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Participants

Vingt-trois élèves en première (CP/N1), troisième (CE2/N3) et cinquième (CM2/N5) années ont participé à cette étude. Ils ont été recrutés dans sept écoles québécoises appartenant aux commissions scolaires de la Région-de-Sherbrooke, des Hauts-Cantons et de Saint-Hyacinthe (Canada), dont les indices de milieu socio-économique sont équivalents – rangs déciles variant entre 4 et 6⁵¹. Ces élèves participaient à un projet de recherche plus large intitulé « Le rôle des habiletés graphomotrices et orthographiques dans la production de textes chez des élèves francophones du primaire : contraintes et développement » (Conseil de recherches en sciences humaines, 2012-2019), dirigé par la professeure Marie-France Morin. Les 69 participants de cette étude ont été retenus selon les critères d'inclusion présentés à la fin du deuxième chapitre.

Comme attendu, l'âge des élèves varie significativement en fonction du niveau scolaire ($F(2,66) = 620.57$, $CM = 97.85$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$). Les élèves de N1 ($M = 6.89$ ans; $ÉT = 0.32$) sont plus jeunes ($p < .001$) que ceux de N3 ($M = 9.11$ ans; $ÉT = 0.42$), lesquels sont à leur tour plus jeunes ($p < .001$) que ceux de N5 ($M = 11.01$ ans; $ÉT = 0.44$). Aucune différence significative n'a toutefois été relevée entre les niveaux scolaires pour le genre ($X^2(2,69) = 1.86$, $p > .39$, $phi = .16$) et la latéralité ($X^2(2,69) = 3.07$, $p > .21$, $phi = .21$). Ainsi, l'échantillon comportait un nombre équivalent de filles ($N = 10, 10, 14$, respectivement) et de garçons ($N = 13, 13, 9$, respectivement), ainsi qu'un nombre similaire de droitiers ($N = 22, 18, 20$, respectivement) et de gauchers ($N = 1, 5, 3$, respectivement).

⁵¹ Les écoles québécoises sont classées sur une échelle allant de 1 à 10, le rang 1 étant considéré comme le moins défavorisé et le rang 10 comme le plus défavorisé (Gouvernement du Québec, 2016).

3.2 Tâches

3.2.1 Tâches d'inclusion

Les tâches d'inclusion qui ont été utilisées auprès des élèves de N3 et N5, évaluant leurs aptitudes non-verbales (Matrices progressives de Raven, version longue : Raven, 1998), leurs habiletés de décodage (La pipe et le rat : Lefavrais, 1986) et leurs compétences orthographiques (Test de niveau orthographique : Doutriaux et Lepez, 1980), sont décrites à la première étude.

Les « Matrices progressives colorées » ont été utilisées pour évaluer les aptitudes non-verbales des élèves de N1 (CPM : Raven, 1998). Ce test se compose de 12 séries, présentées en noir et en blanc ou sur fond coloré, regroupées en trois ensembles.

Deux épreuves de la version francophone du *Test de rendement individuel de Wechsler* (WIAT-II : Wechsler, 2005), soit « Lecture de mots » et « Décodage de pseudo-mots », ont été utilisées pour évaluer la conscience phonologique et les habiletés de décodage des élèves de N1. Pour la première, qui comprend au maximum 131 items, les participants devaient a) rappeler à l'oral le nom des lettres qui leur étaient présentées visuellement, b) identifier des lettres ou des groupements de lettres à leur son, c) sélectionner, parmi un ensemble de mots, ceux qui commençaient ou qui finissaient par le même son (e.g. bête, fête, sac), et d) lire à voix haute une série de mots isolés de difficulté croissante. Pour la seconde, les participants devaient lire à voix haute un maximum de 55 pseudo-mots isolés. Ces deux épreuves ont été arrêtées après 7 échecs consécutifs.

L'épreuve « Orthographe » du WIAT-II (*Ibid.*) a été utilisée pour évaluer l'aptitude générale à orthographier des mots des élèves de N1. Les participants devaient produire correctement leur prénom et leur nom de famille, des lettres, des groupements de lettres et des mots de difficulté croissante. Cette épreuve a été arrêtée après 6 cotes consécutives de 0 point.

Les capacités mémorielles et sensorimotrices des élèves de N1, N3 et N5 ont été évaluées respectivement à partir de l'épreuve « Mémoire des chiffres » du WISC-IV (Wechsler, 2007; cf. Étude 1) et des quatre sous-tests du domaine « Fonctions sensorimotrices » de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012), soit : a) l'« Imitation de positions de mains », qui évalue l'aptitude à imiter des positions de mains et de doigts en utilisant l'analyse visuospatiale, la programmation motrice et le feedback kinesthésique (e.g. « fais un téléphone comme ça »), b) la « Précision visuomotrice » (cf. Étude 2), c) les « Séquences motrices manuelles », évaluant la capacité à imiter une séquence de mouvements rythmiques en se servant d'une ou de deux mains, et d) le « Tapping » (cf. Études 1 et 2).

3.2.2 Tâches graphomotrices

Les participants devaient rappeler par écrit a) les lettres de leur prénom et de leur nom de famille (en commençant par une majuscule), et b) celles de la chaîne alphabétique, dans l'ordre (Abbott et Berninger, 1993). Dans les deux cas, les participants étaient invités à écrire en minuscules, le plus rapidement, mais le mieux possible (cf. Alamargot et al., 2014, 2018; Alamargot et Morin, 2015; Pontart et al., 2013).

3.2.3 Tâche expérimentale

Les participants devaient rappeler par écrit, dans un cahier fixé sur une tablette graphique, 12 mots isolés affichés sur un écran d'ordinateur placé devant eux, le plus rapidement, mais le mieux possible. Dès qu'ils commençaient à écrire un mot, celui-ci s'effaçait automatiquement (cf. Bonin et al., 2015; Lambert et al., 2008, 2015; Sausset et al., 2012). Les participants ne pouvaient donc pas retranscrire les lettres du mot au fur et à mesure qu'ils les voyaient sur l'écran; ils étaient plutôt obligés de maintenir temporairement la trace en mémoire de travail.

3.3 Matériel

Pour la tâche expérimentale, 12 mots fréquents et bisyllabiques, variant en longueur, ont été sélectionnés au sein de la base de données lexicales *Manulex-Infra* de la troisième (CE2) et de la cinquième (CM2) années (Peereman et al., 2007), soit 6 mots courts (4 lettres)

et 6 mots longs (8 lettres). Les mots ont été contrôlés, d'une condition expérimentale à l'autre, selon les mesures linguistiques suivantes : a) la fréquence lexicale, b) la consistance moyenne des associations phonème-graphème, c) le nombre de voisins orthographiques, et d) la fréquence bigrammique moyenne. La liste des stimuli sélectionnés, ainsi que leurs caractéristiques linguistiques, sont rapportées à l'annexe E.

Les tests de Student ne montrent, comme attendu, aucun effet significatif de la Longueur (Courts/Longs) pour la fréquence lexicale ($t(10) = -0.10, p > .92, \eta^2 = .00$) et la fréquence bigrammique moyenne ($t(10) = 1.49, p > .16, \eta^2 = .18$). Les tests non-paramétriques de Mann-Whitney, appliqués en raison de la violation des hypothèses de l'égalité des variances et de la normalité, ne montrent à leur tour aucune différence significative pour la consistance moyenne des associations phonème-graphème ($U = 14.00, z = -0.64, p > .52, \eta^2 = .18$) et le nombre de voisins orthographiques ($U = 10.50, z = -1.43, p > .15, \eta^2 = .41$).

Les tâches d'inclusion ont été réalisées sur papier, avec un stylo. Les données des tâches graphomotrices et de la tâche expérimentale ont été recueillies par un ordinateur portable Toshiba Satellite L745D auquel était connectée une tablette graphique Wacom Intuos4L PTK-840. Sa position était réglée par les participants afin de respecter autant que possible leur posture d'usage. Le stylo numérique était muni d'une mine à encre (Inking pen KP1302) permettant aux participants d'écrire dans un cahier fixé sur la tablette (cf. Figure 15), dans des conditions d'écriture habituelles.

Un enregistrement de la cinématique de la pointe du stylo a été réalisé grâce au logiciel *Eye and Pen*© (Alamargot et al., 2006; Chesnet et Alamargot, 2005). Celui-ci enregistrait en temps réel la position et l'état de la mine (appuyée ou non) sur la tablette et gérait l'apparition des consignes et/ou des stimuli sur l'écran d'ordinateur.

Avec leur allographe usuel⁵² (en minuscules), les participants ont rappelé par écrit les lettres de leur prénom et de leur nom de famille ainsi que celles de l'alphabet sur deux feuilles de papier : l'une présentant deux cases rectangulaires, placées côte à côte (11.8 cm X 1.7 cm chacune), l'autre comportant 26 carrés (1.7 cm X 1.7 cm chacun). Ces cases servaient à imposer l'emplacement de l'écriture sur l'écran de la tablette, afin de contrôler autant que possible les mouvements du stylo dans les airs d'une lettre à l'autre ou d'un mot à l'autre (contrôle des aspects topocinétiques de l'écriture). Elles étaient suffisamment grandes pour ne pas limiter la taille des lettres. Treize autres feuilles, l'une pour un item d'entraînement et les autres pour les items expérimentaux, comprenant une case rectangulaire chacune (11.8 cm X 2.8 cm), ont permis de recueillir l'ensemble des réponses à la tâche expérimentale.

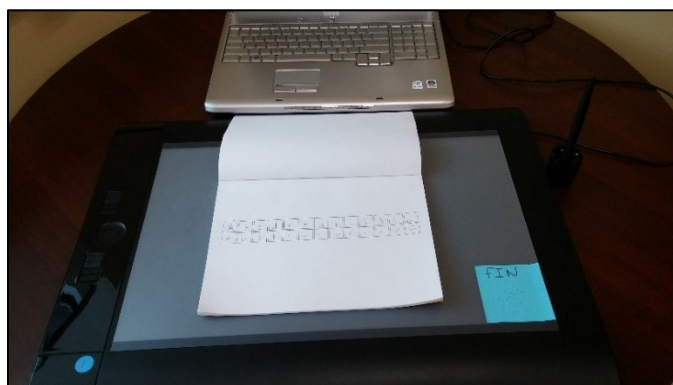


Figure 15 : Dispositif de recueil des mouvements d'écriture à l'Étude 3

3.4 Procédure

La collecte de données a été réalisée en avril et mai 2015 pour les participants de N3 et N5, par deux expérimentatrices. Celles-ci ont été formées pour les besoins de l'étude par deux chercheurs, la professeure Marie-France Morin (directrice québécoise), aussi responsable du projet de recherche plus large dans lequel s'inscrivait cette collecte de

⁵² Étant donné le contexte particulier au Québec, où aucune recommandation précise n'est donnée quant au type d'allographes (script et/ou cursive) à privilégier dans l'enseignement de la graphomotricité (Gouvernement du Québec, 2001, 2009; cf. Morin et al., 2017), le style d'écriture utilisé spontanément par les élèves lors des tâches graphomotrices et de la tâche expérimentale a été analysé : 14 élèves de N1, 1 élève de N3 et 5 élèves de N5 ont produit leur prénom en cursive; 12 élèves de N1, 0 élève de N3 et 4 élèves de N5 ont rappelé les lettres de l'alphabet en cursive; 13 élèves de N1, 0 élève de N3 et 5 élèves de N5 ont écrit les mots de la tâche expérimentale en cursive.

données, ainsi que le professeur Denis Alamargot (directeur français). Le recueil de données des participants de N1 a été réalisé en janvier et février 2017, par l'une de ces deux expérimentatrices.

3.4.1 Ordre de passation des tâches

3.4.1.1 Ordre de passation des tâches en première année

Tous les participants de N1 ont été rencontrés individuellement dans un local calme et silencieux hors de la classe.

Comme indiqué dans le tableau 9, ils ont d'abord effectué, lors d'une première séance d'environ une heure, les tâches d'inclusion de lecture, d'orthographe et d'intelligence générale. Les participants ont ensuite réalisé, au cours d'une deuxième séance d'une trentaine de minutes, les tâches d'inclusion restantes (i.e. Mémoire des chiffres et Fonctions sensorimotrices) et les tâches graphomotrices, en commençant par le rappel écrit du prénom et du nom de famille et en terminant par le rappel écrit de la chaîne alphabétique. La tâche expérimentale a été réalisée au cours d'une troisième séance, d'une durée approximative de 15 minutes.

3.4.1.2 Ordre de passation des tâches en troisième et cinquième années

Tous les participants de N3 et N5 ont d'abord effectué, lors d'une première séance collective réalisée en classe, les tâches d'inclusion de lecture, d'orthographe et d'intelligence générale. La durée de cette première séance, prise en charge par les expérimentatrices, était d'environ une heure.

Les participants ont ensuite été rencontrés individuellement dans un local calme et silencieux de l'école. La durée de cette seconde séance était d'environ 45 minutes. Ils ont d'abord effectué l'épreuve « Mémoire des chiffres » ainsi que les quatre sous-tests des « Fonctions sensorimotrices ». Ils ont ensuite réalisé, dans l'ordre, les tâches graphomotrices (prénom et nom de famille suivis de l'alphabet) et la tâche expérimentale.

Tableau 9 : Ordre de passation des tâches à l'Étude 3

Séance	Durée	Tâches
Première année		
1. Individuelle	60 minutes	1. Lecture de mots et Décodage de pseudo-mots° 2. Orthographe° 3. Matrices progressives colorées de Raven°
2. Individuelle	30 minutes	1. Mémoire des chiffres° 2. Fonctions sensorimotrices° 3. Tâche graphomotrice (prénom et nom de famille) 4. Tâche graphomotrice (alphabet)
3. Individuelle	15 minutes	1. Tâche expérimentale
Troisième et cinquième années		
1. Collective	60 minutes	1. La pipe et le rat* 2. Test de niveau orthographique* 3. Matrices progressives de Raven*
2. Individuelle	45 minutes	1. Mémoire des chiffres° 2. Fonctions sensorimotrices° 3. Tâche graphomotrice (prénom et nom de famille) 4. Tâche graphomotrice (alphabet) 5. Tâche expérimentale

Note. L'ordre de passation des épreuves marquées d'un astérisque simple (*) a été contrebalancé d'une classe à l'autre, alors que l'ordre de passation des épreuves marquées d'un point (°) a été contrebalancé d'un participant à l'autre.

3.4.2 Contrôles méthodologiques

Comme indiqué dans le tableau 9, les tâches d'inclusion ont toutes été contrebalancées d'une classe à l'autre et/ou d'un participant à l'autre afin de neutraliser les effets d'ordre et de fatigue.

Les 12 stimuli de la tâche expérimentale ont été délivrés dans un ordre aléatoire.

3.4.3 Consignes

3.4.3.1 Consignes pour les tâches graphomotrices

La consigne suivante était donnée aux participants pour le rappel écrit du prénom et du nom de famille : « À mon signal, j'aimerais que tu écrives ton prénom dans le premier encadré et ton nom de famille dans le second. Écris en minuscules, le plus vite, mais le mieux possible. Tu peux commencer par une majuscule, comme tu le fais habituellement. Si tu fais une erreur, tu peux faire un trait et recommencer. Lorsque tu auras fini, appuie sur la zone *fin* de la tablette avec ton stylo ».

La consigne suivante était donnée aux participants pour le rappel écrit de la chaîne alphabétique : « À mon signal, j'aimerais que tu écrives les 26 lettres de l'alphabet, dans l'ordre et en minuscules, avec ton écriture habituelle. Tu dois écrire une lettre par case, le plus vite, mais le mieux possible. Si tu te trompes, tu peux faire un trait et recommencer. Lorsque tu auras fini, appuie sur la zone *fin* de la tablette avec ton stylo ».

3.4.3.2 Consigne pour la tâche expérimentale

Pour la tâche expérimentale, la consigne était la suivante : « Un mot va apparaître sur l'écran de l'ordinateur. Tu dois l'écrire dans l'encadré sur ta feuille, le plus rapidement, mais le mieux possible. Attention, il faut que tu regardes bien le mot, car dès que tu commenceras à l'écrire, il disparaîtra de l'écran et tu ne pourras plus le consulter. Tu dois écrire en minuscules, avec ton écriture habituelle. Si tu fais une erreur, tu peux faire un trait et recommencer. Lorsque tu auras fini d'écrire le mot, appuie sur la zone *fin* de la tablette avec ton stylo ».

Lorsque les participants appuyaient sur la zone *fin* de la tablette, après avoir reproduit un mot donné dans l'espace prévu dans leur cahier, une croix s'affichait à l'écran. L'expérimentatrice devait alors appuyer sur une touche de l'ordinateur pour faire apparaître, au rythme dicté par chaque participant, un autre mot.

Afin que les temps de réaction mesurés soient au minimum affectés par le mouvement initial de la main, tous les participants avaient pour consigne, dès qu'ils avaient terminé l'écriture d'un mot, d'adopter une position « prêt à écrire ». Un item d'entraînement, soit le mot « maman », permettait aux participants de se familiariser avec la procédure et à l'expérimentatrice d'intervenir, au besoin.

3.5 Variables mesurées

3.5.1 Mesures pour les tâches d'inclusion

Seules les notes brutes ont été analysées pour l'ensemble des tâches d'inclusion, hormis la note étalonnée composite pour le sous-test « Précision visuo-motrice » de la NEPSY-II (cf. Étude 2). Un score global a aussi été calculé pour le « Tapping », en

additionnant la durée d'exécution des répétitions et des séquences de la main dominante et de la main non-dominante (cf. Étude 1). Un score composite a été calculé pour les habiletés de décodage en lecture des élèves de N1, à partir de la moyenne des sous-tests « Lecture de mots » et « Décodage de pseudo-mots » du WIAT-II.

3.5.2 Mesures pour les tâches graphomotrices

Seuls les prénoms des élèves et les cinq premières lettres de la chaîne alphabétique (ABCDE) ont été analysés.

Le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique (%) a été calculé pour chacune des tâches graphomotrices, soit le nombre de lettres jugées conformes divisé par le nombre total de lettres produites. La conformité d'une lettre a été évaluée selon les critères du *Evaluation Tool of Children's Handwriting* (ETCH : Amundson, 1995). Un point a ainsi été accordé pour chaque lettre formée correctement, en fonction des indices suivants : a) la lettre doit être reconnaissable en dehors du contexte, b) elle ne doit ressembler à aucune autre lettre ou à aucun chiffre, c) elle ne doit pas être inversée ou retournée, d) elle doit être complète (« i » et « j » avec le point; « f » et « t » avec la barre), e) elle ne doit pas être barbouillée, hachurée ou superposée à une autre lettre, et f) elle doit être proportionnelle par rapport aux autres lettres. Des productions d'élèves corrigées sont présentées à l'annexe H.

Les mesures suivantes, qui quantifient les indices spatio-temporels de l'écriture, ont été extraites à partir du logiciel *Eye and Pen*© puis relativisées par le nombre total de lettres produites : a) la longueur du tracé (cm/lettre), qui correspond à la distance parcourue par le stylo lorsqu'il est en mouvement sur la surface d'écriture (pression supérieure à 0), b) la durée de production (ms/lettre), qui correspond au temps écoulé entre le premier et le dernier pixel (cf. Étude 2), c) la durée de mouvement (ms/lettre), qui exclut les moments où le stylo est en pause, et d) la durée des pauses levées ou appuyées (ms/lettre) supérieures au seuil minimal de 20 ms⁵³, qui exclut les moments où le stylo est en mouvement.

⁵³ Exprimée en ms, la valeur du seuil minimal de pause (20 ms) est déterminée par la formule $3 \times (1000/150)$, où 150 est la fréquence d'échantillonnage (Hz) de la tablette graphique. Comme une perte de deux échantillons

3.5.3 Mesures pour la tâche expérimentale

Tous les mots produits, qu'ils soient réussis ou non, ont été conservés. Trois mots ont toutefois dû être supprimés des analyses en raison d'un problème d'enregistrement. L'échantillon comportait donc 276 mots en N1 et N5, ainsi que 273 mots en N3.

Les mesures temporelles suivantes ont été analysées : a) le temps d'encodage des mots, défini comme le temps écoulé entre le moment d'apparition d'un stimulus à l'écran et la première pression exercée sur la pointe du stylo (ms/mot), b) la durée de production (ms/lettre), c) la durée de mouvement (ms/lettre), et d) la durée des pauses (ms/lettre).

Le pourcentage de mots erronés (%) et le pourcentage d'erreurs graphémiques (%) ont également été calculés, en suivant la même procédure que celle adoptée dans l'Étude 2.

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour les tâches graphomotrices, les hypothèses expérimentales de cette étude étaient les suivantes : a) le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique augmentera entre la première, la troisième et la cinquième année, alors que la longueur du tracé par lettre, la durée de production par lettre, la durée de mouvement par lettre et la durée des pauses par lettre diminueront, b) les performances graphomotrices seront meilleures, pour l'ensemble de ces mesures, à la tâche de production du prénom qu'à celle de la série de lettres ABCDE, et c) les écarts de performances entre ces deux tâches se réduiront avec l'augmentation du niveau scolaire.

Des analyses de variance à mesures répétées (ANOVA) comportant un facteur intra-sujets et un facteur inter-sujets ont été réalisées afin de vérifier les effets de la Tâche (ABCDE/P) et du Niveau (N1/N3/N5) sur a) le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique, b) la longueur du tracé par lettre, c) la durée de production par lettre, d) la durée de mouvement par lettre, et e) la durée des pauses par lettre.

successifs est possible durant l'acquisition et la transmission des données au logiciel *Eye and Pen*®, la durée de trois échantillons successifs a été considérée comme seuil minimal de pause (cf. Alamargot et al., 2014).

Pour la tâche expérimentale, les hypothèses étaient les suivantes : le temps d'encodage des mots, la durée d'exécution par lettre et le nombre d'erreurs orthographiques a) diminueront entre la première, la troisième et la cinquième année, et b) augmenteront pour les mots longs comparativement aux mots courts. En outre, l'effet de la longueur des mots diminuera, pour l'ensemble de ces mesures, avec l'augmentation du niveau scolaire.

Des analyses de variance à mesures répétées (ANOVA) comportant un facteur intra-sujets et un facteur inter-sujets ont été réalisées, avec les participants (plan F_1) et les items (plan F_2) comme facteurs aléatoires, afin de vérifier les effets de la Longueur (C/L) et du Niveau (N1/N3/N5) sur a) le temps d'encodage, b) la durée de production par lettre, c) la durée de mouvement par lettre, et d) la durée des pauses par lettre. Des tests non-paramétriques ont été réalisés pour le pourcentage de mots erronés et le pourcentage d'erreurs graphémiques, puisque les distributions de données ne suivaient pas la loi normale. Le test de Kruskal-Wallis, basé sur les rangs au lieu des moyennes, a été utilisé comme alternative à l'analyse de variance afin de vérifier l'effet du Niveau. Le test de Mann-Whitney, qui permet de comparer deux échantillons indépendants entre eux, a été utilisé en post-hoc afin de situer les différences significatives entre les niveaux. L'effet de la Longueur a été évalué au moyen du test de Wilcoxon.

Après une analyse visuelle des boîtes à moustaches, un participant supplémentaire a été supprimé des analyses en N1 pour le temps d'encodage, puisqu'il présentait un score supérieur à trois écarts-types de la moyenne de son groupe dans la condition Longs. L'échantillon de N1 comportait donc, pour cette mesure exceptionnellement, 22 participants. Pour les mêmes raisons, un participant en N1 et un participant en N3 ont également été supprimés des analyses pour la durée des pauses par lettre. L'échantillon comportait donc, pour cette mesure, 22 participants en N1 et N3 ainsi que 23 participants en N5.

4.1 Statistiques descriptives des tâches d'inclusion

Les scores bruts des participants à l'ensemble des tâches d'inclusion sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10
Statistiques descriptives des tâches d'inclusion de l'Étude 3 : moyennes, (écarts-types),
minimum et maximum

	Première année (N1)			Troisième année (N3)			Cinquième année (N5)		
	<i>M (ÉT)</i>	Min	Max	<i>M (ÉT)</i>	Min	Max	<i>M (ÉT)</i>	Min	Max
Intelligence générale									
Matrices de Raven	21.91 (4.62)	14	30	36.65 (5.04)	28	44	42.09 (4.23)	35	50
Compétences en lecture									
Décodage	58.41 (16.22)	14	83	99.26 (25.94)	52	156	119.91 (17.30)	82	151
Compréhension lexicale	—	—	—	45.04 (11.58)	24	67	54.30 (7.55)	38	69
Compétences en orthographe									
Total	12.74 (3.14)	4	19	20.13 (4.35)	12	27	25.48 (3.76)	19	32
Capacités mémorielles									
Empan de chiffres	11.52 (2.15)	9	16	13.09 (1.62)	10	16	13.30 (1.66)	11	16
Capacités sensorimotrices									
Imitation de positions de mains	19.13 (3.17)	14	24	22.70 (1.55)	19	24	23.30 (1.02)	21	24
Précision visuo- motrice	9.04 (2.12)	5	15	9.43 (2.09)	6	15	9.61 (2.35)	5	16
Séquences motrices manuelles	42.57 (5.56)	30	53	49.22 (5.04)	38	58	50.17 (4.83)	41	59
<i>Tapping</i> (total)	52.40 (12.64)	32	79	34.35 (6.02)	23	47	30.53 (6.06)	21	42

Les performances des élèves de N1 sont significativement plus faibles que celles des élèves de N3 ($p < .02$) et N5 ($p < .006$) pour l'épreuve mémorielle d'empan de chiffres ($F(2,66) = 6.51$, $CM = 21.75$, $p < .004$, $\eta^2 = .41$). Les élèves de N1 obtiennent également, contrairement à ceux de N3 et N5, des résultats inférieurs ($p < .001$) à trois sous-tests évaluant leurs capacités sensorimotrices, soit : a) « Imitation de positions de mains » ($F(2,66) = 26.04$, $CM = 116.93$, $p < .001$, $\eta^2 = .66$), b) « Séquences motrices manuelles » ($F(2,66) = 14.88$, $CM = 395.06$, $p < .001$, $\eta^2 = .56$), et c) « Tapping » ($F(2,66) = 40.44$, $CM = 3138,72$, $p < .001$, $\eta^2 = .74$). En revanche, aucune différence significative n'a été relevée entre les niveaux pour le sous-test « Précision visuomotrice » ($F(2,66) = 0.40$, $CM = 1.93$, $p > .66$, $\eta^2 = .11$).

Comme attendu sur un plan développemental, les élèves de N3 performent significativement moins bien que ceux de N5 pour les épreuves d'intelligence générale ($t(44)$

= -3.96, $p < .001$, $\eta^2 = .27$), de décodage ($t(44) = -3.18$, $p < .004$, $\eta^2 = .19$), de compréhension lexicale ($t(44) = -3.21$, $p < .003$, $\eta^2 = .19$) et d'orthographe ($t(44) = -4.46$, $p < .001$, $\eta^2 = .31$). Comme ces compétences intellectuelles et langagières ont été évaluées via d'autres mesures pour les élèves de N1, en raison du niveau nécessaire pour les accomplir, qui a été jugé insuffisant, ce niveau n'a pas été intégré aux dernières comparaisons de moyennes.

4.2 Effets de la Tâche et du Niveau sur les mesures des tâches graphomotrices

Les performances graphomotrices des élèves sont regroupées dans le tableau 11.

Tableau 11

Statistiques descriptives pour les mesures graphomotrices, en fonction de la Tâche (ABCDE/Prénom) et du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) à l'Étude 3 : moyennes, (écarts-types), minimum et maximum

ABCDE					Prénom		
Mesure	Niveau	$M(\acute{E}T)$	Min	Max	$M(\acute{E}T)$	Min	Max
Qualité du tracé							
Pourcentage de lettres conformes au modèle allographique (%)	N1	82.61 (16.30)	60	100	88.83 (17.43)	40	100
	N3	84.35 (14.72)	60	100	92.70 (10.38)	75	100
	N5	93.91 (9.41)	80	100	91.86 (10.26)	71	100
Longueur du tracé (cm/lettre)	N1	2.60 (0.75)	1.24	4.06	2.66 (0.97)	1.53	5.00
	N3	1.64 (0.42)	1.05	2.29	1.60 (0.57)	0.67	2.76
	N5	1.57 (0.31)	0.93	2.18	1.73 (0.52)	1.03	2.90
Cinétique de l'écriture							
Durée de production (ms/lettre)	N1	5518 (1631)	2465	9207	2436 (826)	1075	3760
	N3	1566 (572)	855	2672	996 (275)	594	1779
	N5	1182 (235)	702	1723	811 (300)	507	1604
Durée de mouvement (ms/lettre)	N1	2588 (819)	1060	4304	1574 (637)	553	2673
	N3	755 (269)	447	1318	623 (196)	294	1033
	N5	592 (127)	406	884	553 (211)	331	1041
Durée des pauses (ms/lettre)	N1	2930 (1261)	1364	6500	862 (472)	215	1735
	N3	811 (359)	355	1672	373 (138)	192	747
	N5	590 (165)	296	971	258 (116)	120	578

4.2.1 Pourcentage de lettres conformes au modèle allographique

L'effet principal du facteur Tâche est significatif ($F(1,66) = 4.97$, $CM = 0.06$, $p < .03$, $\eta^2 = .07$). Le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique est significativement

plus élevé dans la condition P ($M = 91.13\%$; $\acute{E}T = 13.04$) que dans la condition ABCDE ($M = 86.96\%$; $\acute{E}T = 14.48$).

L'effet principal du facteur Niveau n'est pas significatif ($F(2,66) = 2.48$, $CM = 0.06$, $p > .09$, $\eta^2 = .07$), tout comme l'effet d'interaction entre les facteurs Tâche X Niveau ($F(2,66) = 2.88$, $CM = 0.03$, $p > .06$, $\eta^2 = .08$).

4.2.2 Longueur du tracé par lettre

L'effet principal du facteur Tâche n'est pas significatif ($F(1,66) = 0.47$, $CM = 0.12$, $p > .49$, $\eta^2 = .01$).

L'effet principal du facteur Niveau est significatif ($F(2,66) = 28.19$, $CM = 15.19$, $p < .001$, $\eta^2 = .46$). La longueur du tracé est uniquement plus élevée pour les élèves de N1 ($M = 2.63$ cm/lettre; $\acute{E}T = 0.70$) que pour ceux de N3 ($M = 1.62$ cm/lettre; $\acute{E}T = 0.44$, $p < .001$) et N5 ($M = 1.65$ cm/lettre; $\acute{E}T = 0.34$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Tâche X Niveau n'est pas significatif ($F(2,66) = 0.48$, $CM = 0.12$, $p > .62$, $\eta^2 = .01$).

4.2.3 Durée de production par lettre

L'effet principal du facteur Tâche est significatif ($F(1,66) = 103.79$, $CM = 62048853$, $p < .001$, $\eta^2 = .61$). La durée de production est significativement plus élevée dans la condition ABCDE ($M = 2755$ ms/lettre; $\acute{E}T = 2210$) que dans la condition P ($M = 1414$ ms/lettre; $\acute{E}T = 900$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif ($F(2,66) = 178.01$, $CM = 124459204$, $p < .001$, $\eta^2 = .84$). La durée de production est uniquement plus importante pour les élèves de N1 ($M = 3977$ ms/lettre; $\acute{E}T = 944$) que pour ceux de N3 ($M = 1281$ ms/lettre; $\acute{E}T = 346$, $p < .001$) et N5 ($M = 997$ ms/lettre; $\acute{E}T = 197$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Tâche X Niveau est significatif ($F(2,66) = 43.94$, $CM = 26266756$, $p < .001$, $\eta^2 = .57$). L'effet du facteur Tâche est significatif pour les

élèves de N1 ($t(22) = 8.36, p < .001, \eta^2 = .76$; différence de 3082 ms/lettre), N3 ($t(22) = 4.78, p < .001, \eta^2 = .51$; différence de 570 ms/lettre) et N5 ($t(22) = 4.84, p < .001, \eta^2 = .51$; différence de 371 ms/lettre), mais diminue avec l'augmentation du niveau scolaire. La figure 16 présente la durée de production par lettre en fonction du Niveau et de la Tâche.

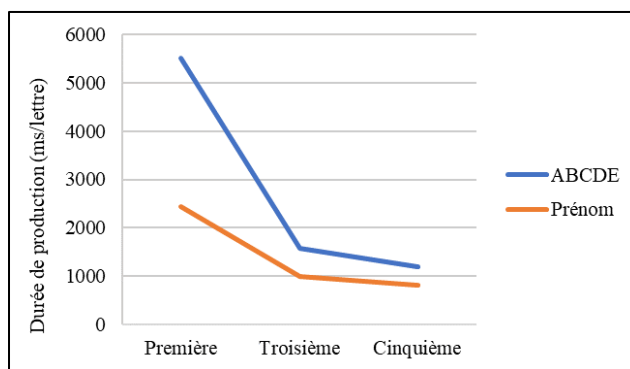


Figure 16 : Évolution de la durée de production par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l'Étude 3

4.2.4 Durée de mouvement par lettre

L'effet principal du facteur Tâche est significatif ($F(1,66) = 41.09, CM = 5382732, p < .001, \eta^2 = .38$). La durée de mouvement est significativement plus importante dans la condition ABCDE ($M = 1312$ ms/lettre; $ÉT = 1038$) que dans la condition P ($M = 917$ ms/lettre; $ÉT = 615$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif ($F(2,66) = 113.66, CM = 32417097, p < .001, \eta^2 = .77$). La durée de mouvement est uniquement plus élevée pour les élèves de N1 ($M = 2081$ ms/lettre; $ÉT = 611$) comparativement à ceux de N3 ($M = 689$ ms/lettre; $ÉT = 200, p < .001$) et N5 ($M = 572$ ms/lettre; $ÉT = 122, p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Tâche X Niveau est significatif ($F(2,66) = 25.36, CM = 3321856, p < .001, \eta^2 = .44$). L'effet du facteur Tâche est significatif pour les élèves de N1 ($t(22) = 5.97, p < .001, \eta^2 = .62$; différence de 1013 ms/lettre), mais non pour ceux de N3 ($t(22) = 2.57, p = .017, \eta^2 = .23$; différence de 132 ms/lettre) avec ajustement de

Bonferroni à .0167 et ceux de N5 ($t(22) = 0.76, p > .45, \eta^2 = .02$; différence de 39 ms/lettre). La figure 17 présente la durée de mouvement par lettre en fonction du Niveau et de la Tâche.

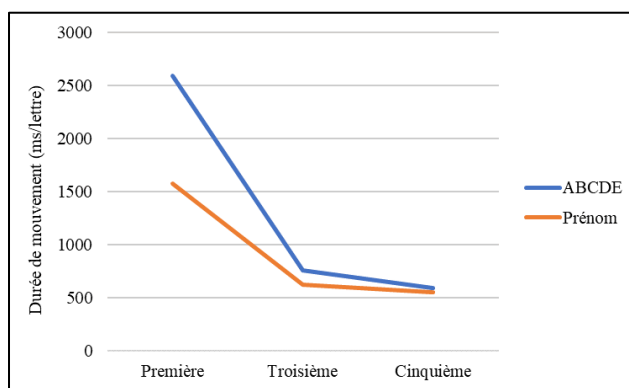


Figure 17 : Évolution de la durée de mouvement par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l'Étude 3

4.2.5 Durée des pauses par lettre

L'effet principal du facteur Tâche est significatif ($F(1,66) = 81.64, CM = 30880623, p < .001, \eta^2 = .55$). La durée des pauses est significativement plus importante dans la condition ABCDE ($M = 1444$ ms/lettre; $\acute{E}T = 1302$) que dans la condition P ($M = 498$ ms/lettre; $\acute{E}T = 390$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif ($F(2,66) = 103.16, CM = 29857943, p < .001, \eta^2 = .76$). La durée des pauses est uniquement plus importante pour les élèves de N1 ($M = 1896$ ms/lettre; $\acute{E}T = 619$) que pour ceux de N3 ($M = 592$ ms/lettre; $\acute{E}T = 198, p < .001$) et N5 ($M = 424$ ms/lettre; $\acute{E}T = 110, p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Tâche X Niveau est significatif ($F(2,66) = 28.85, CM = 10910529, p < .001, \eta^2 = .47$). L'effet de la Tâche est significatif pour les élèves de N1 ($t(22) = 6.85, p < .001, \eta^2 = .68$; différence de 2069 ms/lettre), N3 ($t(22) = 5.63, p < .001, \eta^2 = .59$; différence de 438 ms/lettre) et N5 ($t(22) = 8.73, p < .001, \eta^2 = .78$; différence de 331 ms/lettre), mais diminue avec l'augmentation du niveau scolaire. La figure 18 présente la durée des pauses par lettre en fonction du Niveau et de la Tâche.

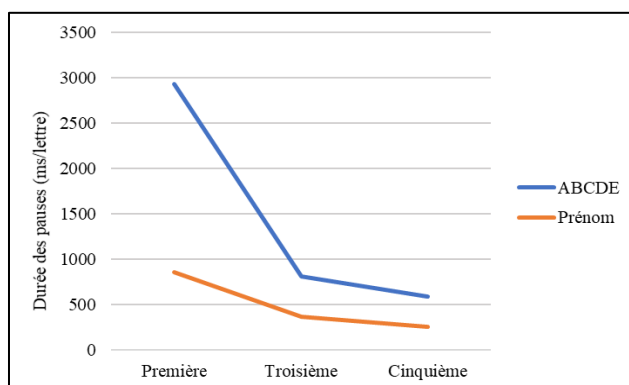


Figure 18 : Évolution de la durée des pauses par lettre aux tâches graphomotrices, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Tâche (ABCDE/Prénom) à l'Étude 3

4.3 Effets de la Longueur et du Niveau sur le temps d'encodage des mots à la tâche expérimentale

Les performances orthographiques des élèves de N1, N3 et N5 à la tâche expérimentale sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12
Statistiques descriptives pour les mesures orthographiques, en fonction du Niveau
(Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3 :
moyennes, (écarts-types), minimum et maximum

Mesure	Niveau	Courts			Longs		
		<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max	<i>M</i> (<i>ÉT</i>)	Min	Max
Temps d'encodage (ms/mot)	N1	4293 (1113)	2107	6064	6521 (2515)	2480	12009
	N3	1925 (514)	898	2859	3035 (1039)	1421	5721
	N5	1816 (498)	1006	3073	2517 (995)	1118	4801
Durée de production (ms/lettre)	N1	2793 (893)	1096	4454	3366 (1582)	1468	9377
	N3	761 (165)	418	1171	819 (247)	489	1751
	N5	576 (100)	438	831	563 (78)	417	777
Durée de mouvement (ms/lettre)	N1	1719 (719)	656	3648	1792 (676)	820	3114
	N3	490 (106)	315	802	488 (104)	340	763
	N5	414 (86)	300	670	404 (98)	276	703
Durée des pauses (ms/lettre)	N1	1009 (502)	426	2572	1299 (608)	209	2437
	N3	268 (97)	103	528	296 (86)	129	465
	N5	163 (67)	38	317	159 (59)	51	282
Pourcentage de mots erronés (%)	N1	16.67 (13.29)	0	50	56.52 (25.49)	17	100
	N3	0.72 (3.47)	0	17	12.32 (16.06)	0	67
	N5	2.90 (6.46)	0	17	1.45 (4.80)	0	17
Pourcentage d'erreurs graphémiques (%)	N1	5.78 (5.66)	0	25	18.52 (15.36)	2	53
	N3	0.35 (1.67)	0	8	2.09 (2.95)	0	12
	N5	0.87 (2.07)	0	8	0.17 (0.58)	0	2

L'effet principal du facteur Longueur est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,65) = 64.90$, $CM = 61601050$, $p < .001$, $\eta^2 = .50$; $F_2(1,10) = 24.98$, $CM = 19939051$, $p < .002$, $\eta^2 = .71$). Le temps d'encodage est significativement plus important dans la condition L ($M = 3987$ ms/mot; $ÉT = 2413$) que dans la condition C ($M = 2654$ ms/mot; $ÉT = 1364$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,65) = 60.20$, $CM = 142646337$, $p < .001$, $\eta^2 = .65$; $F_2(2,20) = 289.07$, $CM = 46877657$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$). Le temps d'encodage est uniquement plus élevé pour les élèves de N1 ($M = 5407$ ms/mot; $ÉT = 1628$) que pour ceux de N3 ($M = 2480$ ms/mot; $ÉT = 699$, $p < .001$) et N5 ($M = 2166$ ms/mot; $ÉT = 693$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Longueur X Niveau est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,65) = 7.37$, $CM = 6994302$, $p < .002$, $\eta^2 = .18$;

$F_2(2,20) = 19.65$, $CM = 3186097$, $p < .001$, $\eta^2 = .66$). L'effet du facteur Longueur est significatif en N1 ($t(21) = -4.91$, $p < .001$, $\eta^2 = .53$; différence de 2228 ms/mot), N3 ($t(22) = -6.22$, $p < .001$, $\eta^2 = .64$; différence de 1110 ms/mot) et N5 ($t(22) = -4.50$, $p < .001$, $\eta^2 = .48$; différence de 701 ms/mot), mais diminue avec l'augmentation du niveau scolaire. La figure 19 présente le temps d'encodage des mots en fonction du Niveau et de la Longueur des mots.

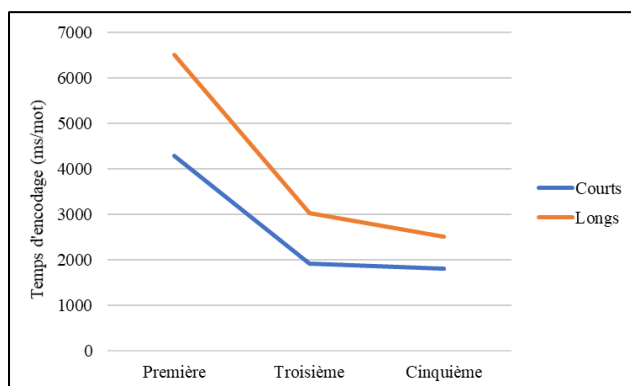


Figure 19 : Évolution du temps d'encodage des mots à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3

4.4 Effets de la Longueur et du Niveau sur la durée d'exécution des mots à la tâche expérimentale

4.4.1 Durée de production par lettre

L'effet principal du facteur Longueur est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,66) = 5.71$, $CM = 1460748$, $p < .03$, $\eta^2 = .08$; $F_2(1,10) = 5.37$, $CM = 381062$, $p < .05$, $\eta^2 = .35$). La durée de production est significativement plus élevée dans la condition L ($M = 1582$ ms/lettre; $ÉT = 1567$) que dans la condition C ($M = 1377$ ms/lettre; $ÉT = 1137$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,66) = 101.13$, $CM = 88832765$, $p < .001$, $\eta^2 = .75$; $F_2(2,20) = 396.83$, $CM = 23173734$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$). La durée de production est uniquement plus importante pour les élèves de N1 ($M = 3079$ ms/lettre; $ÉT = 1130$) que pour ceux de N3 ($M = 790$ ms/lettre; $ÉT = 184$, $p < .001$) et N5 ($M = 570$ ms/lettre; $ÉT = 80$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Longueur X Niveau est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,66) = 4.60$, $CM = 1177169$, $p < .02$, $\eta^2 = .12$; $F_2(2,20) = 5.26$, $CM = 307085$, $p < .02$, $\eta^2 = .34$). L'effet du facteur Longueur diminue graduellement avec l'augmentation du niveau scolaire; aucune différence significative n'est toutefois observée entre les deux conditions pour les élèves de N1 avec ajustement de Bonferroni à .0167 ($t(22) = -2.25$, $p = .035$, $\eta^2 = .19$; différence de 573 ms/lettre) ni pour ceux de N3 ($t(22) = -1.34$, $p > .19$, $\eta^2 = .08$; différence de 58 ms/lettre) et N5 ($t(22) = 0.77$, $p > .44$, $\eta^2 = .03$; différence de -13 ms/lettre). La figure 20 présente la durée de production par lettre en fonction du Niveau et de la Longueur des mots.

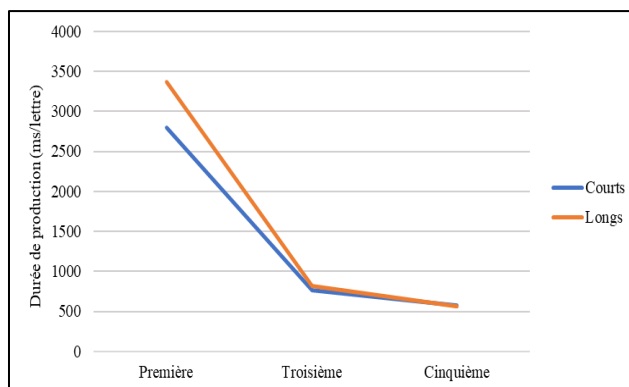


Figure 20 : Évolution de la durée de production par lettre à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3

4.4.2 Durée de mouvement par lettre

L'effet principal du facteur Longueur n'est pas significatif ($F_1(1,66) = 1.43$, $CM = 14037$, $p > .23$, $\eta^2 = .02$; $F_2(1,10) = 0.15$, $CM = 3662$, $p > .70$, $\eta^2 = .01$).

L'effet principal du facteur Niveau est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,66) = 80.20$, $CM = 26272087$, $p < .001$, $\eta^2 = .71$; $F_2(2,20) = 586.44$, $CM = 6853591$, $p < .001$, $\eta^2 = .98$). La durée de mouvement est uniquement plus importante pour les élèves de N1 ($M = 1756$ ms/lettre; $ÉT = 688$) que pour ceux de N3 ($M = 489$ ms/lettre; $ÉT = 102$, $p < .001$) et N5 ($M = 409$ ms/lettre; $ÉT = 89$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Longueur X Niveau n'est pas significatif ($F_1(2,66) = 2.48$, $CM = 24257$, $p > .09$, $\eta^2 = .07$; $F_2(2,20) = 0.54$, $CM = 6328$, $p > .58$, $\eta^2 = .05$).

4.4.3 *Durée des pauses par lettre*

L'effet principal du facteur Longueur est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(1,64) = 8.30$, $CM = 367283$, $p < .006$, $\eta^2 = .12$; $F_2(1,10) = 11.92$, $CM = 310015$, $p < .007$, $\eta^2 = .54$). La durée des pauses est significativement plus grande dans la condition L ($M = 578$ ms/lettre; $\acute{E}T = 618$) que dans la condition C ($M = 475$ ms/lettre; $\acute{E}T = 477$).

L'effet principal du facteur Niveau est également significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,64) = 77.62$, $CM = 13046674$, $p < .001$, $\eta^2 = .71$; $F_2(2,20) = 178.07$, $CM = 4830956$, $p < .001$, $\eta^2 = .95$). La durée des pauses est uniquement plus élevée pour les élèves de N1 ($M = 1154$ ms/lettre; $\acute{E}T = 495$) que pour ceux de N3 ($M = 282$ ms/lettre; $\acute{E}T = 86$, $p < .001$) et N5 ($M = 161$ ms/lettre; $\acute{E}T = 60$, $p < .001$).

L'effet d'interaction entre les facteurs Longueur X Niveau est significatif pour l'analyse par participants et par items ($F_1(2,64) = 6.52$, $CM = 288414$, $p < .004$, $\eta^2 = .17$; $F_2(2,20) = 8.30$, $CM = 225298$, $p < .003$, $\eta^2 = .45$). L'effet du facteur Longueur est significatif pour les élèves de N1 ($t(21) = -2.65$, $p = 0.015$, $\eta^2 = .25$; différence de 290 ms/lettre), mais non pour ceux de N3 ($t(21) = -2.00$, $p > .05$, $\eta^2 = .08$; différence de 28 ms/lettre) et N5 ($t(22) = .40$, $p > .09$, $\eta^2 = .01$; différence de -4 ms). La figure 21 présente la durée des pauses par lettre en fonction du Niveau et de la Longueur des mots.

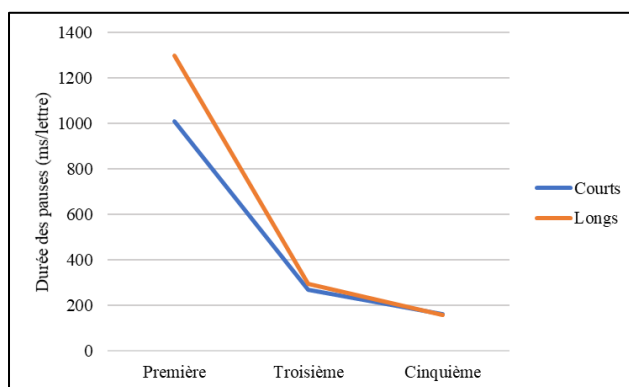


Figure 21 : Évolution de la durée des pauses par lettre à la tâche expérimentale, en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3

4.5 Effets de la Longueur et du Niveau sur le pourcentage de mots erronés à la tâche expérimentale

L'effet du facteur Niveau est significatif tant dans la condition C ($X^2(2,69) = 32.37$, $p < .001$) que dans la condition L ($X^2(2,69) = 47.07$, $p < .001$). Dans la condition C, le pourcentage de mots erronés est uniquement plus élevé pour les élèves de N1 que pour ceux de N3 ($U = 67.50$, $z = -4.98$, $p < .001$, $\eta^2 = .73$) et N5 ($U = 97.50$, $z = -4.13$, $p < .001$, $\eta^2 = .61$). Dans la condition L, le pourcentage de mots erronés est significativement plus élevé pour les élèves de N1 en comparaison à ceux de N3 ($U = 42.50$, $z = -4.99$, $p < .001$, $\eta^2 = .73$) et N5 ($U = 4.00$, $z = -6.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .89$), alors que les élèves de N3 ont un pourcentage de mots erronés significativement plus important que ceux de N5 ($U = 146.50$, $z = -3.216$, $p < .002$, $\eta^2 = .47$).

L'effet du facteur Longueur s'atténue avec l'augmentation du niveau scolaire. Il est significatif pour les élèves de N1 ($z = -3.85$, $p < .001$, $\eta^2 = .80$; différence de 39.85 %) et N3 ($z = -2.95$, $p < .004$, $\eta^2 = .61$; différence de 11.60 %), mais non pour ceux de N5 ($z = -1.41$, $p > .15$, $\eta^2 = .29$; différence de -1.45 %). La figure 22 présente le pourcentage de mots erronés en fonction du Niveau et de la Longueur des mots.

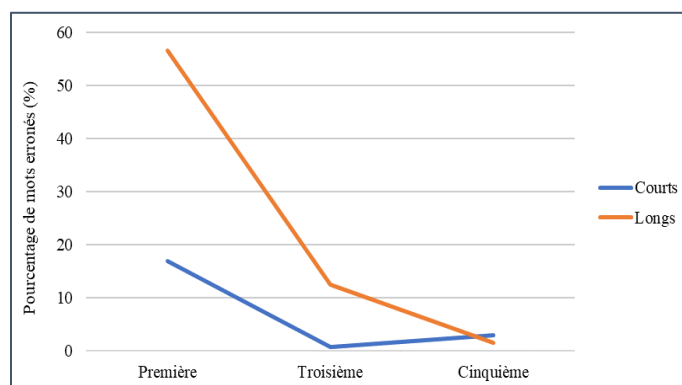


Figure 22 : Évolution du pourcentage de mots erronés en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3

4.6 Effets de la Longueur et du Niveau sur le pourcentage d'erreurs graphémiques à la tâche expérimentale

L'effet du facteur Niveau est significatif tant dans la condition C ($X^2(2,69) = 31.18$, $p < .001$) que dans la condition L ($X^2(2,69) = 47.42$, $p < .001$). Dans la condition C, le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé pour les élèves de N1 que pour ceux de N3 ($U = 72.00$, $z = -4.77$, $p < .001$, $\eta^2 = .70$) et N5 ($U = 94.50$, $z = -4.09$, $p < .001$, $\eta^2 = .60$). Dans la condition L, le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé pour les élèves de N1 en comparaison à ceux de N3 ($U = 40.00$, $z = -4.99$, $p < .001$, $\eta^2 = .74$) et N5 ($U = 3.00$, $z = -6.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .89$), ainsi que pour les élèves de N3 comparativement à ceux de N5 ($U = 143.50$, $z = -3.28$, $p < .002$, $\eta^2 = .48$).

L'effet du facteur Longueur s'atténue avec l'augmentation du niveau scolaire. Il est significatif pour les élèves de N1 ($z = -3.47$, $p < .002$, $\eta^2 = .72$; différence de 12.74 %), mais non pour ceux de N3 ($z = -2.37$, $p = .018$, $\eta^2 = .49$; différence de 1.74 %) avec ajustement de Bonferroni à .0167 ni ceux de N5 ($z = -1.84$, $p > .06$, $\eta^2 = .38$; différence de -0.70 %). La figure 23 présente le pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction du Niveau et de la Longueur des mots.

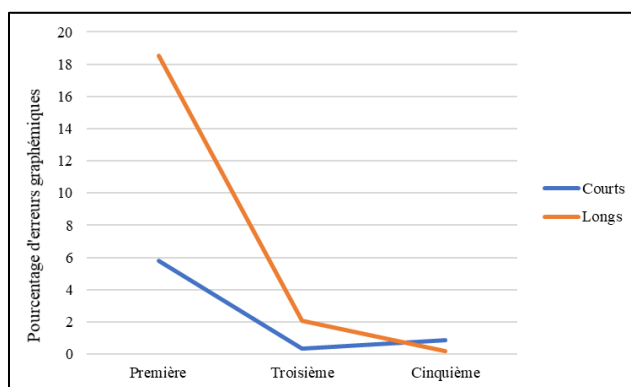


Figure 23 : Évolution du pourcentage d'erreurs graphémiques en fonction du Niveau (Première/Troisième/Cinquième) et de la Longueur des mots (Courts/Longs) à l'Étude 3

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le premier objectif de cette étude était de décrire et de comparer les performances graphomotrices d'élèves francophones du primaire à différents niveaux d'acquisition et de procéduralisation des programmes moteurs. Pour ce faire, il a été demandé à des élèves de première (CP), troisième (CE2) et cinquième (CM2) années – chez lesquels les traitements graphomoteurs n'imposent pas le même coût cognitif en mémoire de travail – de réaliser deux tâches sur une tablette graphique : le rappel écrit des lettres ABCDE et celui du prénom. Les performances des élèves ont été comparées sur le plan a) de la qualité du tracé, évaluée via le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique, et b) des caractéristiques spatio-temporelles du mouvement d'écriture, opérationnalisées par i) la longueur du tracé par lettre, ii) la durée de production par lettre, iii) la durée de mouvement par lettre, et iv) la durée des pauses par lettre.

Les résultats montrent que les performances graphomotrices sont significativement plus faibles chez les élèves de première année que chez ceux de troisième et cinquième années, hormis pour le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique qui demeure constant d'un niveau à l'autre. En outre, les performances graphomotrices sont meilleures pour le Prénom que pour l'ABCDE pour a) le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique, indépendamment du Niveau, b) la durée de production par lettre et la durée des pauses par lettre, l'effet de la Tâche diminuant toutefois avec l'augmentation du

niveau scolaire, et c) la durée de mouvement par lettre chez les élèves de première année uniquement.

Le deuxième objectif de cette étude était de déterminer si le coût cognitif des traitements graphomoteurs a un effet sur le décours temporel de l'écriture et le nombre d'erreurs orthographiques commises lors de la production écrite de mots isolés, ce d'autant plus que la charge de maintien au sein du *buffer* graphémique est élevée. Pour y répondre, il a été demandé aux élèves de réaliser une tâche de rappel immédiat écrit de 12 mots fréquents sur une tablette graphique. Nous avons fait varier a) le coût cognitif des traitements graphomoteurs, en manipulant le Niveau scolaire (première vs troisième vs cinquième année), et b) la charge de maintien au sein du *buffer* graphémique, en manipulant la Longueur des mots (courts/4 lettres vs longs/8 lettres). Trois angles d'analyse ont été considérés : a) le temps d'encodage des mots, b) la durée d'exécution des mots, incluant i) la durée de production par lettre, ii) la durée de mouvement par lettre, et iii) la durée des pauses par lettre, et c) la réussite lexicale et la réussite graphémique des mots, mesurées respectivement selon i) le pourcentage de mots erronés, et ii) le pourcentage d'erreurs graphémiques.

Les résultats montrent que le temps d'encodage des mots est a) significativement plus élevé pour les élèves de première année comparativement à ceux de troisième et cinquième années, et b) toujours plus important pour des mots longs que pour des mots courts, l'effet de la Longueur s'atténuant toutefois avec l'augmentation du niveau scolaire.

Concernant la durée d'exécution des mots, les résultats montrent a) que les élèves de première année consacrent significativement plus de temps à la production des lettres, que l'on considère aussi bien le temps de mouvement que le temps de pause, que ceux de troisième et cinquième années, et b) que la durée des pauses par lettre est significativement plus élevée pour les mots longs que pour les mots courts, mais uniquement pour les élèves de première année.

Par ailleurs, le pourcentage de mots erronés est significativement a) plus important chez les élèves de première année que chez ceux de troisième et cinquième années, b)

équivalent pour les élèves de troisième et cinquième années pour les mots courts, c) plus élevé pour les élèves de troisième année que pour ceux de cinquième année pour les mots longs, et d) plus important pour les mots longs que pour les mots courts en première et troisième années uniquement. De son côté, le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement a) supérieur chez les élèves de première année que chez ceux de troisième et cinquième années, b) équivalent pour les élèves de troisième et cinquième années pour les mots courts, c) plus élevé pour les élèves de troisième année que pour ceux de cinquième année pour les mots longs, et d) plus important pour les mots longs que pour les mots courts chez les élèves de première année seulement.

5.1 Évolution des performances graphomotrices

5.1.1 Effet du Niveau sur la qualité du tracé

Les résultats que nous avons obtenus dans cette étude ne corroborent pas l'hypothèse que nous avons formulée au regard du pourcentage de lettres conformes au modèle allographique : même si ce dernier tend à augmenter d'un niveau scolaire à l'autre, les différences n'atteignent pas le seuil de signification. Trois pistes interprétatives peuvent être envisagées pour expliquer ce point de divergence entre notre étude et celles qui sont présentées dans le cadre théorique (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Graham et al., 1998; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990; Overvelde et Hulstijn, 2011).

a) La qualité du tracé a été appréciée, dans le cadre des études que nous avons recensées, en portant un jugement plutôt global sur les productions des élèves – tenant compte de la forme des lettres, mais aussi de leur agencement au sein des mots et de leur organisation sur la page (cf. Danna et al., 2016). Cette évaluation, qui demeure relativement générale même si elle repose sur des critères prédéterminés (Albaret, Kaiser et Soppelsa, 2013), diffère de celle que nous avons privilégiée dans le cadre de notre étude. Selon Amundson (1995), la qualité du tracé devrait être évaluée, afin d'éviter toute subjectivité, selon des cas de figure rencontrés pour chacun des allographes. Ce principe de conformité, qui appelle à isoler les lettres de leur contexte de production et à les analyser de manière indépendante, a été adopté précédemment par Karlsdottir et Stefansson (2002). Ces chercheurs ont évalué le degré de

ressemblance entre les lettres produites par des élèves de la première à la cinquième année lors de la copie d'un texte et leur modèle alphabétique standard. Sur le plan développemental, cette étude néerlandaise a montré que la qualité du tracé augmentait fortement au cours de la première année de scolarisation avant d'atteindre un plateau. Les résultats de ces chercheurs rejoignent probablement les nôtres en raison de la similarité de nos critères d'analyse, s'attardant à la forme des lettres et non à leur régularité ou à leur alignement.

b) Selon Sovik et Arntzen (1986), la qualité du tracé est facilitée lorsque le coût cognitif en mémoire de travail est allégé. Ainsi, le fait que le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique soit équivalent chez l'ensemble des élèves, contrairement à ce qui était attendu, pourrait également être attribué au degré de complexité plus ou moins élevé de nos tâches graphomotrices.

Comme nous l'avons relevé lors de nos deux études précédentes, le prénom contient la chaîne de lettres la plus familière pour les élèves, étant régulièrement produite au préscolaire avant l'apprentissage formel de l'écriture. Il est d'ailleurs recommandé, au Québec, d'utiliser les prénoms des élèves dans des activités de conscience phonologique et d'orthographe approchées en maternelle pour qu'ils puissent découvrir le principe alphabétique et s'entraîner au tracé des lettres (Gouvernement du Québec, 2018). Selon le *Programme de formation de l'école québécoise* (Ibid., 2001), dont les orientations rejoignent, à cet égard, celles du Ministère de l'éducation nationale (2015) en France, les élèves doivent être en mesure de reconnaître instantanément leur prénom et de l'écrire conventionnellement en première année. Ainsi, les représentations visuelles des lettres du prénom pourraient déjà, en raison de son utilisation fréquente en classe ou de sa pratique répétée, être suffisamment renforcées et intégrées en mémoire à long terme chez les élèves de première année.

Selon Graham, Weintraub et Berninger (2001), la qualité du tracé suit une évolution très rapide en début de scolarité – lorsqu'elle est évaluée de manière analytique – et ne pose des difficultés aux élèves que pour une minorité de lettres. Ces chercheurs ont identifié huit lettres minuscules scriptes, retrouvées au milieu et à la fin de la chaîne alphabétique, qui sont plus problématiques pour les élèves américains de première année : les lettres « q », « z »,

« g », « u », « n », « k », « j » et « y ». Ces élèves maîtrisent donc déjà, tout comme ceux de notre étude, la forme des cinq premières lettres de l'alphabet, qui sont d'ailleurs relativement fréquentes en français (Peereman et al., 2007). Dans cette perspective, le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique pourrait varier entre la prise en compte des 26 lettres de la chaîne alphabétique ou des cinq premières.

c) Les différences entre notre étude et d'autres qui l'ont précédée pourraient être expliquées par la grande variabilité relevée dans les critères d'analyse et dans les tâches graphomotrices, mais également par le contexte socio-éducatif dans lequel baignaient les élèves. À notre connaissance, les études antérieures qui se sont intéressées au développement de la qualité du tracé au cours du primaire, notamment auprès d'élèves de première, troisième et cinquième années, ont uniquement été menées aux Pays-Bas pour l'écriture cursive (Blöte et Hamstra-Bletz, 1991; Hamstra-Bletz et Blöte, 1990) et aux États-Unis (Graham et al., 1998) pour l'écriture scripte. Comme nous l'avons abordé dans la problématique, la composante graphomotrice de l'écriture est considérée, dans le système québécois, comme une technique qu'il faut apprendre, indépendamment du style allographique, et non comme un savoir qu'il faut développer (Gouvernement du Québec, 2001). En effet, le programme de formation insiste encore, malgré la parution récente d'un bulletin spécial au sujet de la graphomotricité qui nuance les instructions officielles toujours en vigueur (*Ibid.*, 2013, 2018), sur l'esthétisme du tracé et non sur la fluidité du geste. Dans cette perspective, une enquête québécoise menée par Lavoie et al. (2015) a montré que les enseignants de première année tenaient davantage compte, lors de l'évaluation de la graphomotricité, de l'espacement régulier entre les mots et de la formation des lettres que de la vitesse d'écriture. Ainsi, l'atteinte d'un degré de conformité déjà élevé en première année pourrait être expliquée par les directives ministérielles et les pratiques pédagogiques qui en découlent. Autrement dit, la qualité du tracé pourrait évoluer plus rapidement au Québec qu'ailleurs et être déjà optimale au milieu de la première année, contrairement à la durée de production.

5.1.2 Effet du Niveau sur les caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur

Contrairement à ce que nous avons anticipé, la taille des lettres et leur durée de production – que l'on considère aussi bien le temps de mouvement que le temps de pause – diminuent fortement entre la première et la troisième année (7 et 9 ans), mais demeurent identiques entre la troisième et la cinquième année (9 et 11 ans). Les études empiriques qui se sont précédemment intéressées au développement du geste graphomoteur avaient pourtant montré une augmentation de la vitesse de tracé ainsi qu'une diminution de la taille des lettres, de la durée d'exécution et du nombre de pics de vitesse jusqu'en quatrième année (10 ans) dans des tâches de copie directe de lettres cursives isolées, de bigrammes ou de pseudo-mots (Chartrel et Vinter, 2006; Kandel et Perret, 2014; Mojet, 1991).

Le fait qu'un plateau soit atteint en troisième année dans notre étude, soit un an plus tôt qu'attendu, pourrait être expliqué par la nature même des tâches graphomotrices que nous avons administrées aux élèves, qui diffèrent des études précédentes et qui ne sollicitent probablement pas les mêmes processus perceptivo-moteurs et cognitifs. En effet, les épreuves de copie directe nécessitent, contrairement au rappel écrit du prénom et de l'ABCDE, un encodage visuel : le modèle doit être reproduit de manière fidèle. Ainsi, la copie d'un mot ou d'un texte sollicite plus fortement que le rappel écrit d'une série de lettres les capacités visuo-attentionnelles ou d'intégration visuo-motrice des élèves, ce qui pourrait ralentir en retour la programmation et l'exécution du geste graphomoteur (Rosenblum et al., 2004).

La stabilité des performances entre la troisième et la cinquième année, qui témoigne d'une intégration déjà efficace, à 9 ans, des indices de conformité et de vitesse en cours d'écriture, pourrait également être expliquée par les contraintes qui ont été exercées sur la production graphomotrice. Le fait d'écrire le plus vite possible dans des cases – ce que les élèves ont fait dans notre étude et non dans celles que nous avons recensées – pourrait avoir optimisé la taille des lettres et leur durée de production (Chartrel et Vinter, 2008; Meulenbroek et Van Galen, 1986). En effet, les contraintes spatiales pourraient permettre aux élèves d'adopter une trajectoire plus appropriée en a) s'organisant ou se repérant

visuellement sur la page, et b) proportionnant leur geste d'écriture. Quant aux contraintes temporelles, elles pourraient réduire le temps disponible pour tenir compte du feedback visuel dans le contrôle des morphocinèses (Danna et Velay, 2015), ce qui accélérerait la production. Dans cette perspective, imposer une contrainte de vitesse a probablement aidé les élèves à adopter une stratégie plus proactive de l'écriture, leur permettant alors de programmer des mouvements plus longs (i.e. facilitant un *chunking* des unités graphomotrices).

5.1.3 Effet de la Tâche sur les performances graphomotrices

Les résultats de cette étude montrent que les performances graphomotrices des élèves sont significativement meilleures à la tâche du prénom qu'à celle de l'ABCDE. Seule la longueur du tracé par lettre est équivalente entre les deux tâches, potentiellement en raison de l'adaptation du geste graphomoteur aux contraintes spatiales (Chartrel et Vinter, 2008); la hauteur des cases était de 1,7 cm dans les deux cas, ce qui pourrait avoir influencé la taille des lettres.

Le rappel écrit de l'ABCDE, contrairement à celui du prénom, altère davantage la forme des lettres, et ce quel que soit le niveau scolaire. Ce résultat était attendu dans la mesure où le prénom représente le mot le plus familier pour les élèves et celui par lequel l'entrée dans l'écrit à la maternelle est la plus répandue (Gouvernement du Québec, 2001, 2018; Pontart et al., 2013). Les représentations visuelles des lettres du prénom sont donc logiquement intégrées plus précocement que celles d'autres lettres tracées et/ou enchaînées moins fréquemment.

Comme attendu, les écarts de moyennes entre les deux tâches se réduisent avec l'augmentation du niveau scolaire – et le développement des habiletés graphomotrices – sur le plan de la cinétique. Le rappel écrit de l'ABCDE a) rallonge la durée de mouvement par lettre en première année uniquement, comparativement à celui du prénom, et b) augmente – jusqu'à trois fois plus – la durée de production et la durée des pauses par lettre en première, troisième et cinquième années. Ces résultats confirment le statut particulier du prénom : ses programmes moteurs apparaissent plus fortement procéduralisés que ceux des cinq premières

lettres de la chaîne alphabétique, même si ces dernières sont relativement fréquentes et ont sans doute été travaillées régulièrement en classe. Les lettres du prénom pourraient ainsi être groupées en un seul ou plusieurs *chunk(s)* en fonction du niveau d'expertise des élèves (Anderson, 1983), facilitant sa programmation et son exécution (Pontart et al., 2013).

Le décours temporel de l'écriture pourrait être compromis pour l'ABCDE en raison des demandes cognitives, linguistiques et mémorielles imposées par cette tâche (e.g. rappel ordonné, écriture de lettres isolées entraînant une séquentialisation des mouvements d'écriture), qui s'ajoutent au coût des traitements graphomoteurs. Comme nous l'avons précisé dans la problématique, l'ensemble de ces exigences pourrait peser sur la mémoire de travail et obliger les élèves à ralentir ou à s'arrêter plus fréquemment et/ou plus longtemps (Bonin et Fayol, 1996). Ces effets sont probablement plus importants chez les élèves de première année puisqu'ils ont des capacités mémorielles limitées jumelées à de faibles habiletés graphomotrices et orthographiques. Par exemple, les connaissances phonographémiques sont impliquées plus fortement à la tâche de l'ABCDE qu'à celle du prénom, particulièrement en début d'apprentissage.

Même si cette interprétation apparaît la plus plausible, un bémol doit néanmoins y être apporté : contrairement aux lettres du prénom qui ont été rappelées dans un seul rectangle, celles de l'ABCDE ont été produites isolément dans 5 carrés. Ces cases ont été utilisées afin d'éviter que les élèves n'insèrent des virgules ou des tirets entre les lettres produites, ce qui aurait biaisé les mesures temporelles. Ce choix méthodologique s'accompagne toutefois de l'inconvénient d'avoir provoqué des pauses inter-lettres nécessaires pour marquer la transition d'une case à l'autre. Leur durée, qui est incluse dans le temps de production, est donc plus ou moins artificielle. Ces différences expérimentales sont susceptibles d'avoir accentué l'écart de performances entre les tâches graphomotrices. La durée de mouvement, qui exclut toute pause, est néanmoins plus importante pour la tâche de l'ABCDE que pour celle du prénom pour les élèves de première année. Ce résultat renforce, quel que soit l'effet engendré par les contraintes topocinétiques, l'idée d'une mise en place et d'une procéduralisation plus précoces des programmes moteurs pour certaines lettres tracées plus fréquemment, telles que celles du prénom.

5.2 Évolution du temps d'encodage des mots

En sachant que les procédures d'assemblage et d'adressage s'améliorent au cours du primaire, au fil des expositions à l'écrit (Delahaie, 2009), nous avons anticipé une diminution du temps d'encodage des mots entre la première, la troisième et la cinquième année. Cette hypothèse n'est pas entièrement appuyée par nos résultats : le temps d'encodage des mots est uniquement plus important chez les élèves de première année, ne différant pas entre ceux de troisième et cinquième année.

Le temps de traitement plus important en première année témoigne d'une stratégie de décodage de « gauche à droite », utilisée indépendamment des caractéristiques lexicales et/ou sous-lexicales des mots : par défaut, les élèves lisent de manière séquentielle. Une question qui se pose ici est celle de l'unité de traitement en lecture. Afin d'y répondre, nous avons calculé un ratio de longueur, en divisant le temps d'encodage des mots longs (8 lettres) par celui des mots courts (4 lettres). Ce ratio est de 1,5 en première année. Ce résultat complémentaire suggère que l'unité de lecture est plus grande que la lettre, auquel cas le ratio aurait été de 2,0. Ainsi, des groupements de lettres (e.g. bigrammes, trigrammes, morphèmes, syllabes) peuvent être reconnus visuellement et combinés entre eux pour identifier les mots en début d'apprentissage (cf. Aghababian et Nazir, 2000), un signe de la mise en place précoce d'une stratégie orthographique (Demont et Gombert, 2004). De leur côté, les élèves de troisième et cinquième années peuvent identifier ou reconnaître plus rapidement les mots fréquents en raison de l'amélioration de la médiation phonologique et, à plus forte raison, de la spécification des représentations lexicales en mémoire à long terme (Sprenger-Charolles et al., 2003).

En outre, les résultats de cette étude montrent que l'effet de la longueur des mots diminue avec l'augmentation du niveau scolaire, mais demeure significatif jusqu'en cinquième année. Cet effet d'interaction attendu reflète une automatisation progressive – non encore achevée – de la lecture : même si le temps de traitement des mots s'accélère au cours du primaire, la reconnaissance lexicale, qui coexiste probablement avec la médiation phonologique, n'est pas encore indépendante du nombre de lettres qu'ils contiennent

(Dehaene, 2011). Les élèves de cinquième année ne traitent donc pas encore toutes les parties de la chaîne de lettres en même temps comme le font théoriquement les experts pour les mots fréquents (Delahaie, 2009; Weekes, 1997). Ce résultat rejoint ceux d'autres études expérimentales qui ont analysé les mouvements oculaires lors de la lecture de mots fréquents courts et longs, présentés isolément ou en contexte phrastique, auprès d'élèves de la première à la sixième année (Aghababian et Nazir, 2000; Huestegge et al., 2009; Hyöna et Olson, 1995; Joseph, Liversedge, Blythe, White et Rayner, 2009; Rau et al., 2014, 2015; Tiffin-Richards et Schroeder, 2015; Zoccolotti, De Luca, Di Pace, Gasperini, Judica et Spinelli, 2005).

5.3 Évolution de la durée d'exécution des mots

Les résultats de cette étude montrent que les élèves de première année mettent, en moyenne, quatre fois plus de temps pour écrire les mots à la tâche expérimentale que ceux de troisième et cinquième années. Contrairement à ce que nous avons anticipé, ces deux groupes ne diffèrent pas entre eux : la durée de production des mots chute fortement entre la première et la troisième année, quelle que soit leur longueur, mais demeure équivalente entre la troisième et la cinquième année. Cet effet de grande taille, qui rejoint d'ailleurs celui que nous avons relevé à la tâche du prénom et à celle de l'ABCDE, peut être mis en lien avec l'étude espagnole de Gonzalez-Martin et al. (2017). Ces chercheurs ont montré que la durée de production des mots dans une tâche de copie diminuait avec l'augmentation du niveau scolaire, étant uniquement plus importante chez des élèves de deuxième année que chez ceux de quatrième et sixième années.

Le gain de vitesse important entre la première et la troisième année peut s'expliquer, du moins en partie, par une meilleure efficacité des traitements graphomoteurs. Celle-ci témoigne du passage progressif d'un mode de contrôle rétroactif à un mode de contrôle proactif des mouvements d'écriture (cf. Danna et Velay, 2015). Dans une tâche de rappel immédiat, la procéduralisation des programmes moteurs peut s'accompagner d'au moins trois retombées : a) elle laisse plus de ressources cognitives disponibles en mémoire de travail, le coût cognitif requis par les traitements graphomoteurs étant considérablement

réduit, b) elle permet aux séquences graphémiques des mots d'être transcrites rapidement et sans pause majeure, ce qui réduit la nécessité de recourir à une nouvelle application des correspondances phonème-graphème ou à une réactivation du lexique en cas d'oubli, et c) elle évite de ce fait que les représentations orthographiques soient maintenues longtemps dans le *buffer* graphémique, où elles s'exposent aux interférences (Torrance et Galbraith, 2006).

La diminution de la durée de production des mots chez les élèves de troisième et cinquième années n'est pas non plus incompatible avec l'hypothèse d'une représentation anticipée des mouvements d'écriture. Cette anticipation graphomotrice, qui émerge autour de 9 ans (Kandel et Perret, 2014), pourrait survenir a) au cours de la phase de rappel (localement), afin de maintenir une certaine régularité (Portier et al., 1990; Thomassen et Schomaker, 1986), ou b) plus en amont, lors de la phase d'encodage des mots. L'idée d'une activation des programmes moteurs au cours de la période qui précède l'initiation du geste d'écriture peut être envisagée de la façon suivante : grâce à une pratique plus intensive de la lecture et de l'écriture, les élèves de troisième et cinquième années ont vraisemblablement construit et renforcé davantage que ceux de première année les représentations phonologique, orthographique et graphomotrice des lettres et de certaines configurations de mots en mémoire à long terme. Ces représentations multimodales résultent d'un couplage fonctionnel entre la perception et la production du langage écrit (cf. James, 2017; Longcamp et al., 2016). Comme nous l'avons abordé à la fin du cadre théorique, ces représentations pourraient éventuellement s'affiner et s'intégrer au sein d'un même système procédural (Pérez et al., 2012; Wagner et al., 2011). Ainsi, la reconnaissance de mots fréquents – qui ont été maintes fois entendus, lus et produits, indépendamment de leur longueur – pourrait activer automatiquement les programmes moteurs des lettres qui sont nécessaires pour les écrire, au moment même où leur forme orthographique est déposée dans le *buffer* graphémique. Cet « amorçage moteur » pourrait être semblable à celui d'un sportif qui active de façon inconsciente, à la simple vue d'une balle, les programmes moteurs nécessaires à l'action d'en attraper ou d'en frapper une (James et Gauthier, 2006).

Ainsi, la perception des mots pourrait s'accompagner, dans une tâche de rappel immédiat, d'une prédiction des gestes à venir : les mouvements pourraient être en partie ou entièrement programmés à l'avance avant le début de l'action, ce qui accélérerait la production. Dans cette perspective, les lettres contenues dans les mots fréquents pourraient être regroupées en un seul ou plusieurs *chunk(s)* au cours de la production écrite, au même titre que le prénom des élèves (Peake et al., 2017; Pontart et al., 2013), ce qui éviterait de les traiter individuellement. La durée de production par lettre, la durée de mouvement par lettre et la durée des pauses par lettre sont d'ailleurs similaires entre la tâche expérimentale et celle du prénom – et même plus courtes – chez les élèves de troisième et cinquième années, ce qui suggère l'atteinte d'un niveau de procéduralisation déjà élevé au sein de la production écrite. Cet assemblage des unités graphomotrices, facilité en présence de séquences familières (Hulstijn et Van Galen, 1983; Portier et al., 1990), permettrait à la série de graphèmes composant les mots d'être rappelée de mémoire comme un « tout » : le mouvement serait rapide et dénué de longues pauses. Cette hypothèse interprétative d'une intégration des connaissances lexicales et graphomotrices pour des mots fréquents devra être approfondie par d'éventuelles études.

Dans un autre ordre d'idées, les résultats que nous avons obtenus montrent que l'effet de la longueur des mots sur leur durée d'exécution diminue avec l'augmentation du niveau scolaire : la durée des pauses par lettre est plus importante pour les mots longs que pour les mots courts, mais uniquement en première année.

La forte mobilisation des connaissances déclaratives, associée à l'application sérielle des correspondances phonème-graphème, à une augmentation du nombre de graphèmes à maintenir actifs dans le *buffer* graphémique, à la convocation des allographes nécessaires pour les écrire et à la gestion locale du tracé, entraîne sans doute une rupture des processus chez les scripteurs qui ne possèdent pas encore de programmes moteurs ou chez lesquels ces programmes moteurs ne sont pas encore procéduralisés (Pontart et al., 2013). Les élèves de première année, qui possèdent d'ailleurs de plus faibles capacités mnésiques, pourraient être contraints de traiter et de contrôler chacun des processus impliqués dans la production écrite d'un mot successivement : le coût cognitif des traitements graphomoteurs serait si élevé et

l'écriture si lente qu'ils pourraient uniquement gérer l'orthographe des mots au cours des pauses (Fayol et Lété, 2012). Ainsi, la durée des pauses par lettre serait plus importante pour les mots longs que pour les mots courts, comparativement à la durée de mouvement par lettre qui demeure invariable dans ces deux conditions, en raison des coûts de maintien et de traitement supplémentaires en mémoire de travail (Afonso et al., 2015; Hulstijn et Van Galen, 1983; Van der Plaats et Van Galen, 1990). L'amélioration des habiletés graphomotrices couplée à une augmentation de l'empan de la mémoire de travail pourraient réduire voire annuler l'effet de la longueur des mots chez les élèves de troisième et cinquième années. Cette explication est cohérente avec les résultats d'autres études encore peu nombreuses menées auprès d'élèves de 8 à 12 ans (Gonzalez-Martin et al., 2017; Suarez-Coalla et al., 2018) et d'adultes (Hulstijn et Van Galen, 1983; Planton et al., 2017).

Ainsi, le coût cognitif élevé des traitements graphomoteurs chez les élèves de première année pourrait conduire – au même titre que l'utilisation de majuscules dans nos deux premières études – à un dépassement de la capacité de la mémoire de travail (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), entraînant a) une augmentation de la durée des pauses par lettre, et b) un déclin de la trace orthographique dans le *buffer* graphémique, ce d'autant plus que les mots sont longs.

5.4 Évolution du nombre d'erreurs orthographiques

Cette étude montre que les mots longs entraînent plus d'erreurs que les mots courts en première et troisième années seulement, lorsque le pourcentage de mots erronés est considéré. Ce résultat va à l'encontre de ceux de Gonzalez-Martin et al. (2017), n'ayant observé aucun effet de la longueur des mots sur le nombre d'erreurs orthographiques chez des élèves espagnols de deuxième, quatrième et sixième années dans des tâches de copie et de dictée de mots variant en fréquence. Notons toutefois que le contraste entre les mots courts (5 lettres) et les mots longs (7 lettres) n'était pas aussi élevé que celui de notre étude, ce qui pourrait contribuer, parmi d'autres facteurs (e.g. différences dans la nature des tâches et du matériel, degré d'opacité du système orthographique, absence de critères d'inclusion détaillés pour le recrutement des participants), aux différences. En revanche, nos résultats rejoignent ceux d'une étude italienne menée auprès d'élèves de première et deuxième années, ayant

montré que le pourcentage de mots erronés était plus élevé pour des items longs (8-9 lettres) que pour des items courts (4-5 lettres) dans une tâche de dictée de mots fréquents et de pseudo-mots, ce d'autant plus que les élèves étaient jeunes (Cossu et al., 1995). De son côté, l'absence de différence significative entre les deux conditions de mots chez les élèves de cinquième année rejoint les résultats d'autres études menées auprès d'adultes (cf. Afonso et al., 2015; Planton et al., 2017). Les traitements graphomoteurs sont plus rapides et moins exigeants pour eux, ce qui leur laisse une part croissante de ressources cognitives disponibles pour le stockage des représentations orthographiques.

Même si le profil de performances des élèves de première et troisième années se recoupe dans notre étude, l'effet de la longueur sur le pourcentage de mots erronés s'appuie sans doute sur deux interprétations différentes :

a) Comme nous l'avons mentionné dans la dernière section, le coût cognitif requis par les traitements graphomoteurs chez les élèves de première année capte d'importantes ressources cognitives dans le réservoir attentionnel, au détriment du maintien des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique. Ces oublis, maximisés en présence de mots longs, nécessitent une réactivation ou une reconstitution des traces orthographiques, deux processus difficiles à réitérer lorsque les capacités mémorielles et langagières des scripteurs sont limitées.

Les élèves de première année commettent ainsi plus d'erreurs pour les mots longs que pour les mots courts en raison du nombre plus élevé de graphèmes à calculer et à programmer au pas-à-pas, mais aussi à retenir. Notons ici que la consigne de vitesse que nous avons fournie aux élèves – les mots devant être écrits le plus rapidement possible, limitant toute vérification ou toute correction – pourrait avoir contribué à la surcharge de coût(s) en mémoire de travail (Bourdin, 1999; Fayol et Miret, 2005). Comme les traces orthographiques des mots ne pouvaient pas être restituées par un retour visuel au modèle, en raison de la nature de notre tâche expérimentale, les élèves en surcharge étaient condamnés à l'erreur.

Ces résultats rejoignent ceux de notre deuxième étude : plus les traitements graphomoteurs sont coûteux (i.e. contrôlés), plus la dégradation de la représentation

orthographique d'un mot – même fréquent – est importante (Buchwald et Rapp, 2009; Caramazza et al., 1987; Costa et al., 2011; Goodman et Caramazza, 1986; Wing et Baddeley, 1980, 2009). Cette explication s'expose toutefois à une critique dans le cadre de cette troisième étude : comme nous n'avons pas évalué le degré de précision de la lecture, nous pouvons simplement supposer que les élèves ont déposé dans le *buffer* graphémique une trace résultant de traitements optimaux lors de l'encodage. Une mauvaise identification des mots dans une tâche de rappel immédiat mènerait inévitablement à des erreurs orthographiques, indépendamment du coût des traitements graphomoteurs.

b) Même s'ils peuvent mobiliser certaines ressources cognitives tout au long du primaire (Pontart et al., 2013), les traitements graphomoteurs ne sont probablement pas un facteur déterminant dans la production d'erreurs orthographiques chez les élèves de troisième année – lorsqu'ils utilisent leur allographe préférentiel – pour deux raisons interreliées. D'une part, leurs performances graphomotrices sont équivalentes, sur le plan statistique, à celles des élèves de cinquième année à la tâche du prénom et à celle de l'ABCDE, ce qui suggère que le coût cognitif de la graphomotricité est négligeable. D'autre part, leur durée de production à la tâche expérimentale est équivalente à celle des élèves de cinquième année, la procéduralisation des programmes moteurs semblant déjà installée pour ces deux groupes d'élèves. Ainsi, l'augmentation significative du pourcentage de mots erronés chez les élèves de troisième année, ce d'autant plus que les mots sont longs, pourrait être provoquée par leurs compétences en lecture et en orthographe qui accusent un retard par rapport à celles des élèves de cinquième année sur la base des tests d'inclusion. Ces compétences langagières déficitaires pourraient compromettre l'encodage et/ou le rappel des mots, quand un rafraîchissement des traces orthographiques est rendu nécessaire.

6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les résultats de cette troisième étude montrent que la qualité du tracé est déjà optimale chez des élèves de première année lors du rappel écrit de l'ABCDE et celui du prénom, contrairement aux caractéristiques spatio-temporelles du mouvement d'écriture qui atteignent un plateau en troisième année. Les performances graphomotrices des élèves sont

également meilleures à la tâche du prénom qu'à celle de l'ABCDE indépendamment du niveau scolaire des élèves, ce qui suggère une mise en place et une procéduralisation plus précoces des programmes moteurs (i.e. mécanisme de *chunking*) pour des lettres tracées et enchaînées plus fréquemment, comme celles du prénom.

Dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), cette étude montre que l'amélioration des habiletés graphomotrices avec l'augmentation du niveau scolaire a) diminue le coût cognitif des traitements graphomoteurs, ce qui laisse une part croissante de ressources cognitives disponibles pour assurer le maintien des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique (i.e. contrainte capacitaire), et b) permet aux représentations orthographiques d'être écrites plus rapidement, avant qu'elles ne déclinent dans le *buffer* graphémique (i.e. contrainte liée au temps). Plus spécifiquement, cette étude montre que la durée des pauses par lettre et le nombre d'erreurs orthographiques dans une tâche de rappel immédiat écrit de mots isolés sont d'autant plus élevés que les mots sont longs et que les élèves sont jeunes (i.e. plus les coûts de maintien et de traitement en mémoire de travail sont importants).

7. LIMITES DE L'ÉTUDE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Cette troisième étude comporte plusieurs limites, pour lesquelles nous proposons un certain nombre de solutions ou d'améliorations possibles.

Afin de minimiser les traitements orthographiques à la tâche expérimentale, nous avons uniquement sélectionné des mots fréquents, dont les représentations peuvent être récupérées directement par adressage. Ces mots étaient donc tous, *a priori*, connus des élèves. Or, les caractéristiques de ces mots ont été extraites de la base de données *Manulex-Infra* de la troisième et de la cinquième années (Peereman et al., 2007). Les statistiques distributionnelles de notre corpus n'étaient donc pas représentatives du lexique adressé aux élèves de première année. Plus concrètement, les mots fréquents pour les élèves de troisième et cinquième années pourraient avoir représenté des mots non-fréquents pour ceux de première année, ce qui pourrait avoir accentué les écarts de performances entre ces niveaux.

Soulignons également que la base de données *Manulex-Infra* s'appuie sur une analyse des manuels scolaires en usage en France. Comme cette étude a été menée au Québec, il aurait sans doute été plus approprié de recourir à un outil rendant compte des caractéristiques linguistiques des mots que les élèves québécois étaient le plus susceptibles de lire et d'écrire dans les différentes disciplines scolaires. Dans une future recherche, les stimuli pourraient être sélectionnés au sein d'une base de données québécoise, comportant une échelle d'acquisition de l'orthographe lexicale (ÉQOL : Stanké et al., 2019). Le matériel expérimental pourrait également être sélectionné selon des critères plus stricts, comme nous l'avons fait pour les deux premières études, prenant en compte d'autres variables linguistiques susceptibles d'influencer la production écrite (e.g. nombre de phonèmes, nombre de graphèmes, point d'unicité orthographique, fréquence syllabique, valeur d'imagerie, etc.).

Les compétences orthographiques des élèves de première année ont été évaluées par le biais de l'épreuve « Orthographe » du WIAT-II (Wechsler, 2005). Celle-ci, contrairement au « Test de niveau orthographique » (Doutriaux et Lepez, 1980) utilisé en troisième et cinquième années, n'implique pas de cases à cocher. Les réponses doivent plutôt être écrites par les élèves, ce qui fait non seulement appel à leurs connaissances orthographiques, mais également à leurs habiletés graphomotrices (i.e. effet confondant). Or, les résultats que nous avons obtenus dans le cadre de cette recherche doctorale montrent que le coût cognitif des traitements graphomoteurs peut influencer la réussite orthographique. Ainsi, les performances des élèves de première année obtenues à l'épreuve « Orthographe » du WIAT-II (Wechsler, 2005) sont susceptibles de ne pas refléter aussi fidèlement leurs compétences orthographiques, comme le permettrait une autre tâche sans interférence graphomotrice.

Les différences interindividuelles et développementales sur le plan de la graphomotricité et de l'orthographe pourraient dépendre d'un facteur qui n'a pas été contrôlé dans le cadre de cette troisième étude : le style allographique des élèves. Ce dernier variait entre les niveaux et au sein d'un même niveau : près de la moitié des élèves de première année a écrit en lettres cursives aux tâches graphomotrices et à la tâche

expérimentale, contrairement à une minorité d'élèves en troisième et cinquième années qui privilégiait plutôt le script. Or, ces deux allographes n'imposent pas les mêmes défis sur le plan de la planification et du contrôle moteur. Même si les preuves démontrant les avantages de l'un ou de l'autre des styles ne sont pas encore suffisantes (Schwellnus, Cameron et Carnahan, 2012), le script serait plus simple à maîtriser en raison a) de la simplicité des traits horizontaux, verticaux et diagonaux, et b) des nombreux levers de crayon, qui permettent de programmer la trajectoire à suivre pour former la lettre suivante. La cursive serait plus complexe compte tenu a) des tracés courbes réalisés dans le sens antihoraire, b) des nombreux changements de direction, et c) des traits inter-lettres nécessaires pour assurer la continuité du mouvement (Bara et al., 2011; Gouvernement du Québec, 2013; Meulenbroek et Van Galen, 1986; Morin et al., 2017). Des études comparatives ont d'ailleurs montré que les élèves écrivaient plus lisiblement et/ou plus rapidement en script qu'en cursive lors du rappel écrit de la chaîne alphabétique (Morin et al., 2012; Rouleau, 2016) ou de la copie d'un texte (Bara et Morin, 2013; Graham, Weintraub et Berninger, 1998). Afin d'éviter cette variable confondante (i.e. mixité des allographes mobilisés), il serait plus pertinent à l'avenir de retenir uniquement, au sein de l'échantillon, des participants qui écrivent en script ou en cursive. Il pourrait également être intéressant d'évaluer, par une analyse comparative, si – et dans quelle mesure – l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe est modulé par le style allographique des élèves.

Le nombre restreint de participants ne permet pas de généraliser les résultats à la population. Répliquer cette étude avec un effectif plus grand permettrait d'augmenter le pouvoir statistique des données et de réaliser d'autres analyses inférentielles, telles que des régressions linéaires (pour l'écriture dactylographique : Peake et al., 2017). Ces dernières permettraient d'évaluer plus directement la part de la graphomotricité dans la réussite et le déroulement temporel des traitements orthographiques, en répondant notamment aux questions suivantes : les performances graphomotrices à la tâche du prénom et à celle de l'ABCDE expliquent-elles une part de la variance associée aux performances orthographiques à la tâche de rappel immédiat écrit de mots isolés? Ces deux tâches graphomotrices représentent-elles un « facteur prédictif » dans la relation? Quelle est la contribution de chacune des mesures

graphomotrices (i.e. qualité du tracé et caractéristiques spatio-temporelles du mouvement d'écriture), en fonction du niveau scolaire des élèves, dans la prédiction des performances orthographiques? Il pourrait également être intéressant, dans une prochaine étude, d'ajouter des covariables dans les analyses de variance (ANCOVA). Nous pourrions ainsi déterminer si l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe persiste lorsque les capacités mémorielles, sensorimotrices et langagières des élèves sont contrôlées, en dehors du dispositif expérimental (i.e. via les tâches d'inclusion).

Contrairement à ce que nous avons anticipé, cette étude transversale montre que les performances graphomotrices des élèves de troisième année sont similaires à celles des élèves de cinquième année. Ce résultat suggère, à l'issue de cette recherche, a) d'analyser l'évolution des performances graphomotrices entre le début et la fin de l'année scolaire, sachant que la qualité du tracé, la fluidité et la vitesse d'écriture s'améliorent significativement au cours d'une même année (Morin et al., 2012; Rouleau, 2016), b) de compléter le portrait des habiletés graphomotrices en considérant des élèves d'autres niveaux scolaires (e.g. deuxième et quatrième années), chez lesquels le coût cognitif des traitements graphomoteurs est susceptible de varier, et c) de faire une étude longitudinale (suivi de cohortes d'élèves), afin de mieux comprendre comment les programmes moteurs se mettent en place et se procéduralisent (i.e. étudier la stabilité et le changement des performances graphomotrices sur une longue période de temps).

Dans la même lignée, il serait pertinent de broser un portrait plus précis du développement de la graphomotricité et de l'orthographe (et de leur relation au cours de l'école primaire) en affinant encore davantage les mesures temporelles auxquelles nous avons eu recours. Il serait possible, comme l'ont fait Alamargot et al. (2014), d'analyser la fréquence des pauses et de les catégoriser selon leur durée. Une telle analyse permettrait de déterminer si les pauses courtes, qui sont liées aux hésitations dans l'exécution du tracé (i.e. « pauses graphomotrices », comprises entre 20 et 199 ms), et les pauses longues, qui sont plutôt liées aux demandes linguistiques (Olive et al., 2009), évoluent en fonction du niveau scolaire des élèves et de la nature des tâches qui leur sont proposées.

Dans une tâche de rappel immédiat, les élèves sont condamnés à l'erreur en cas d'oubli. Afin de mieux comprendre les échanges qui s'opèrent entre le traitement et le stockage au cours de la production écrite, une seconde tâche expérimentale pourrait être proposée aux élèves. Les mots pourraient s'effacer de l'écran dès que les participants les ont lus et commencent à les écrire, tel que nous l'avons fait, mais être reconsultés au besoin par un appel au modèle qui interrompt la production. Ce moyen permettrait aux élèves de réactiver, en accédant à la forme stable des mots, leurs représentations orthographiques. Il permettrait de cibler à quel moment au cours de la production écrite la perte d'information en mémoire de travail s'est manifestée, autrement dit où et quand la trace s'est déclinée dans le *buffer* graphémique. Similairement, il pourrait être pertinent de proposer une tâche de copie directe aux élèves, autorisant en tout temps les consultations au modèle. Comptabiliser le nombre de levers de regard et leur localisation dans le mot (cf. Humblot et al., 1994; Kandel et Valdois, 2006a, 2006b), ou bien enregistrer les mouvements oculaires au cours de l'écriture (cf. Alamargot et al., 2015; Alamargot, Plane, Lambert et Chesnet, 2010), permettrait de déterminer si et où un rafraîchissement des traces orthographiques est nécessaire. Ce type de dispositifs fournirait des indications plus précises sur le déroulement des mécanismes cognitifs impliqués dans la production orthographique.

Dans cette étude, la durée de production par lettre représente seulement une moyenne. Elle n'a pas été calculée précisément pour chaque lettre, en déterminant par détournage le début et la fin de chacune. Une analyse lettre par lettre à la tâche expérimentale permettrait de déterminer si la diminution progressive de la charge de maintien dans le *buffer* graphémique, au fur et à mesure qu'il se « vide », influence le décours temporel de l'écriture. La durée de production pourrait en effet décliner au cours d'un mot plus le nombre de graphèmes à maintenir actifs dans le *buffer* graphémique se réduit (cf. Kandel et Perret, 2015).

Afin de mieux comprendre le déclin des traces orthographiques dans le *buffer* graphémique, il pourrait être pertinent dans les suites de cette recherche doctorale d'analyser

plus finement les erreurs commises par les élèves, en déterminant leur position dans les mots. À titre d'exemple, la présence d'un effet de primauté (i.e. le rappel est supérieur en début de mot) ou de récence (i.e. le rappel est supérieur en fin de mot) pourrait refléter l'endroit où les interférences surviennent (De Partz, 2018).

SIXIÈME CHAPITRE

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette recherche doctorale était d'évaluer, dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), l'influence des traitements graphomoteurs sur les traitements orthographiques au cours de la production écrite de mots isolés chez des scripteurs francophones du primaire. Trois études ont été menées au Québec et en France afin de confirmer la présence – et la nature – de cet effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe lexicale, deux processus de bas niveau en compétition pour l'attribution des ressources cognitives limitées du réservoir attentionnel.

La première étude s'intéressait aux effets d'une variation du coût cognitif de la programmation graphomotrice sur le nombre d'erreurs orthographiques produites lors de l'écriture de mots isolés dont le traitement orthographique est plus ou moins complexe à réaliser. Pour ce faire, il a été demandé à 118 élèves français de troisième année (CE2) de produire sous dictée, le plus rapidement mais le mieux possible, 20 mots en lettres minuscules (cursives) et 20 mots en lettres majuscules (scriptes), variant en fréquence et en consistance. Diverses raisons ont motivé le choix de recourir aux lettres majuscules afin d'augmenter le coût cognitif de la programmation graphomotrice (Bourdin et Fayol, 1994, 2002; Grabowski, 2010; Olive et al., 2007, 2009; Olive et Kellogg, 2002; Sausset et al., 2012). Cet allographe pourrait a) rallonger le temps d'accès aux programmes moteurs des lettres stockés en mémoire à long terme, en raison de leur fréquence d'utilisation réduite, et b) solliciter davantage les fonctions exécutives des élèves. En effet, produire des mots en majuscules pourrait nécessiter, lettre après lettre, une inhibition sélective des programmes moteurs les plus procéduralisés (i.e. ceux des lettres minuscules), activés simultanément. Cette modalité entraîne également une séquentialisation des mouvements d'écriture plutôt inhabituelle pour des élèves entraînés à la cursive, nécessitant un *déchunking* des unités graphomotrices. L'intérêt de manipuler l'allographe de production a d'abord été éprouvé en dehors du dispositif expérimental, par le biais d'une tâche – le rappel écrit du prénom – qui ne mobilise aucun traitement orthographique (cf. Pontart et al., 2013).

Nous anticipions que l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice limiterait les ressources cognitives disponibles pour gérer l'orthographe des mots à la tâche de dictée, entraînant des erreurs d'autant plus nombreuses que les traitements orthographiques sont complexes. Les résultats obtenus appuient partiellement cette hypothèse de recherche : le pourcentage de mots erronés augmente significativement lorsque les élèves produisent des mots en recourant aux lettres majuscules, mais cet effet perturbateur de la graphomotricité n'est pas d'autant plus important que les mots sont non-fréquents et inconsistants (i.e. nécessitent un calcul orthographique coûteux). L'effet *bottom-up* est uniquement significatif pour les mots fréquents, dont les représentations orthographiques sont *a priori* récupérées par adressage, une procédure peu consommatrice en ressources cognitives (cf. Ferrand et al., 2018). Les résultats de cette première étude montrent qu'un surcoût de la programmation graphomotrice peut entraîner une diminution de la réussite orthographique d'un mot en agissant à au moins deux niveaux : a) en perturbant la stabilité de sa représentation orthographique maintenue active dans le *buffer* graphémique, dans l'attente de sa prise en charge par les processus périphériques (Ellis, 1982; Van Galen, 1992), et/ou b) en empêchant le recours à une réactivation du lexique en cas d'oubli.

Afin d'augmenter la validité de ces résultats, cette expérimentation a été reconduite avec un plan intra-sujets au cours d'une deuxième étude : les élèves devaient produire sous dictée les mêmes mots en minuscules et en majuscules, ce qui permettait de distinguer véritablement les erreurs de performance des erreurs de compétence (Bonin, 2003; Schelstraete et Maillart, 2004). Les premières sont occasionnelles, provoquées par une charge supplémentaire en mémoire de travail (effet indirect), alors que les secondes sont récurrentes, plutôt causées par des connaissances absentes, lacunaires ou erronées de l'orthographe (effet direct). L'analyse lexicale des mots a par ailleurs été complétée par une analyse graphémique des mots, une mesure plus sensible que le pourcentage de mots erronés parce qu'elle tient compte du nombre d'erreurs commises dans chaque mot (Daigle et al., 2013; Plisson et al., 2010). Pour mieux comprendre la relation d'échange (i.e. *trade-off*) entre le maintien et le traitement des informations en mémoire de travail (Barrouillet et Camos, 2007; Just et Carpenter, 1992), cette deuxième étude cherchait à déterminer si une variation du coût

cognitif de la programmation graphomotrice a un effet non seulement sur le nombre d'erreurs orthographiques commises lors de la production écrite de mots isolés, mais également sur la temporalité de l'écriture. Afin d'y répondre, il a été demandé à 48 élèves français de troisième année (CE2) de produire sur une tablette graphique, le plus rapidement mais le mieux possible, 40 mots tant en minuscules qu'en majuscules, variant en fréquence et en consistance. Leur durée de production a été enregistrée et analysée grâce au logiciel *Eye and Pen*© (Alamargot et al., 2006; Chesnet et Alamargot, 2005).

Nous anticipions que l'augmentation du coût cognitif de la programmation graphomotrice a) rallongerait la durée de production des mots, ce d'autant plus que les traitements orthographiques sont complexes, et b) provoquerait, par la limitation des ressources cognitives, des erreurs d'autant plus fréquentes au sein des mots que les traitements orthographiques sont complexes. Les résultats obtenus n'appuient pas entièrement ces hypothèses de recherche. D'une part, la durée de production des mots est significativement plus élevée quand les élèves recourent aux lettres majuscules, indépendamment de leur fréquence et de leur consistance. D'autre part, le pourcentage d'erreurs graphémiques est significativement plus élevé lorsque les élèves produisent des mots en recourant aux lettres majuscules, ce d'autant plus que les mots sont inconsistants. Ces résultats valident et approfondissent ceux de la première étude. Ils montrent qu'une programmation graphomotrice plus coûteuse s'accompagne d'une réduction de la vitesse d'écriture, ce qui impose alors un maintien prolongé des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique le temps que se réalisent les traitements graphomoteurs. Plus ces traitements consomment de ressources cognitives, plus l'activation qui sert à stocker temporairement les représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique est « désaffectée » (i.e. déplacement du « focus attentionnel »); plus les traitements graphomoteurs sont lents, plus les représentations orthographiques des mots s'estompent (Camos et Barrouillet, 2014). Ainsi, les performances orthographiques des élèves sont dépendantes de l'efficacité des traitements graphomoteurs sur deux plans : a) la durée nécessaire pour programmer et exécuter les lettres contenues dans chacun des mots, qui détermine en fait la période pendant laquelle les traces orthographiques déclinent dans le

buffer graphémique, et b) les ressources cognitives qui sont consacrées aux processus périphériques, aux dépens du maintien et des mécanismes centraux dédiés au rafraîchissement des représentations orthographiques avant leur disparition complète de la mémoire de travail. Une nouvelle application des correspondances phonème-graphème et/ou une nouvelle récupération lexicale, qui apparaissent d'autant plus complexes quand les mots comportent des inconsistances (Bonin et al., 2008), semble(nt) uniquement possible(s) si des ressources cognitives sont épargnées par les traitements graphomoteurs. Autrement dit, des traitements graphomoteurs coûteux sur le plan attentionnel (i.e. contrôlés) peuvent empêcher la reconstruction ou la réactivation des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, deux processus luttant contre leur dégradation au cours du temps.

Dans cette perspective, la production orthographique devrait être d'autant plus lente et inexacte que les habiletés graphomotrices des élèves sont réduites (Pontart et al., 2013) et que le nombre d'informations à retenir simultanément en mémoire de travail est grand (Cossu et al., 1995; Gonzalez-Martin et al., 2017). Telle est la question qui figurait au cœur de notre dernière étude, qui visait deux objectifs.

Le premier objectif de l'Étude 3 était de mieux comprendre comment le geste graphomoteur se développe chez des scripteurs francophones du primaire, en considérant aussi bien la qualité du tracé que les caractéristiques spatio-temporelles des mouvements d'écriture. Pour ce faire, il a été demandé à 23 élèves québécois de première (CP), troisième (CE2) et cinquième (CM2) années de rappeler sur une tablette graphique, le plus rapidement mais le mieux possible, leur prénom et les cinq premières lettres de l'alphabet (ABCDE) en minuscules. Ces niveaux scolaires ont été choisis puisqu'ils correspondent, ainsi que nous le proposons à la lumière du modèle ACT d'Anderson (1983), à trois « phases temporelles » du développement graphomoteur : la phase déclarative-interprétative, la phase de compilation et la phase de *tuning*, transitions marquées par un allègement du coût cognitif des traitements graphomoteurs (cf. Tableau 1).

Nous anticipions une amélioration des performances graphomotrices entre le début, la mi-parcours et la fin de l'école primaire, indépendamment de la tâche. Les résultats

obtenus n'appuient pas complètement cette hypothèse de recherche : a) le pourcentage de lettres conformes au modèle allographique ne varie pas entre les niveaux, et b) la taille des lettres et leur durée de production (mouvement et/ou pauses) diminuent significativement entre la première et la troisième année, mais ne diffèrent plus entre la troisième et la cinquième année. Ainsi, la qualité du tracé (i.e. produit) apparaît déjà optimale en première année contrairement à la durée des traitements graphomoteurs (i.e. processus), qui atteint un plateau en troisième année. Nous nous attendions également à ce que les performances graphomotrices des élèves soient meilleures à la tâche du prénom qu'à celle de l'ABCDE, en raison de son degré de familiarité élevé. Comme attendu, les lettres du prénom sont produites plus lisiblement et plus rapidement que celles de l'ABCDE pour l'ensemble des élèves, les différences entre ces deux tâches s'amenuisant néanmoins avec l'augmentation du niveau scolaire. Ces résultats confortent, en accord avec le modèle ACT d'Anderson (*Ibid.*), l'interprétation d'une mise en place et d'une procéduralisation plus précoces des programmes moteurs pour des lettres ou des suites de lettres tracées plus fréquemment.

Le second objectif de cette étude était d'évaluer si une variation du coût cognitif des traitements graphomoteurs a un effet sur le nombre d'erreurs orthographiques et le décours temporel de l'écriture, lorsque les mots requièrent un maintien plus ou moins prolongé dans le *buffer* graphémique. Pour ce faire, il a été demandé aux élèves de première, troisième et cinquième années de réaliser une tâche de rappel immédiat écrit de mots isolés (copie différée) sur une tablette graphique. Ils devaient rappeler, le plus rapidement mais le mieux possible, 12 mots fréquents – minimisant la complexité des traitements orthographiques – variant en longueur (4 vs 8 lettres). Ce facteur a été manipulé dans la mesure où il entraîne une variation du nombre de lettres à stocker temporairement jusqu'aux étapes ultérieures consacrées à leur production.

Nous anticipions que l'augmentation du coût cognitif des traitements graphomoteurs a) rallongerait la durée d'exécution des mots, ce d'autant plus que les élèves sont jeunes et que les mots sont longs, et b) retirerait des ressources cognitives dédiées au maintien des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, provoquant des erreurs d'autant plus fréquentes au sein des mots que les élèves sont jeunes et que les mots sont longs. Les

résultats obtenus confirment partiellement ces hypothèses de recherche : la durée des pauses par lettre et le pourcentage d'erreurs graphémiques sont significativement plus élevés pour les élèves de première année que pour ceux de troisième et cinquième années seulement, ce d'autant plus que les mots sont longs. Cette baisse de performances résulte des coûts de traitement et de maintien supplémentaires en mémoire de travail.

Dans l'ensemble, les trois études que nous avons menées dans le cadre de cette recherche doctorale montrent une diminution de la réussite orthographique quand les ressources cognitives mobilisées pour les traitements graphomoteurs sont élevées. Cet effet *bottom-up* est modulé par le degré de procéduralisation des programmes moteurs. En effet, une diminution du coût cognitif des traitements graphomoteurs avec l'âge et la pratique a deux retombées positives au cours de la production écrite d'un mot isolé. Elle permet a) de libérer des ressources cognitives qui deviennent alors disponibles pour le maintien des représentations orthographiques dans le *buffer* graphémique, détournant autrement dit l'attention du traitement vers le stockage, et b) d'écrire plus rapidement, permettant aux représentations orthographiques d'être transcrites ou restaurées avant qu'elles ne s'estompent complètement de la mémoire de travail.

CONCLUSION

Cette recherche doctorale, réalisée dans le cadre d'une cotutelle franco-qubécoise, est inscrite dans un double ancrage : celui de l'éducation et de la psychologie cognitive. Nous proposons à titre de conclusion d'en présenter les retombées scientifiques, politiques et éducatives. De nouvelles pistes de recherche dans le domaine de la graphomotricité, outre celles qui ont été envisagées à la fin du cinquième chapitre, sont également suggérées.

1. RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET PISTES DE RECHERCHE FUTURES

Sur le plan conceptuel, l'un des apports de cette recherche doctorale est d'avoir eu recours au modèle ACT d'Anderson (1983), qui conçoit l'apprentissage par l'action comme un mécanisme de *chunking*, pour formaliser le développement de la graphomotricité. Ce dernier peut ainsi être envisagé comme un continuum d'acquisition et de procéduralisation des programmes moteurs, venant ainsi nuancer et dépasser l'approche binaire (absence ou présence des programmes moteurs) souvent privilégiée en psychologie cognitive (cf. Kandel et Perret, 2015). Recourir à la tâche du prénom et à celle de l'ABCDE pour évaluer les performances graphomotrices des élèves francophones – tant sur le plan de la qualité du tracé que des caractéristiques spatio-temporelles des mouvements d'écriture – constitue également un apport scientifique. De plus, cette recherche doctorale permet d'approfondir, dans le cadre de la théorie capacitaire (Just et Carpenter, 1992; McCutchen, 1996), les études corrélationnelles et d'entraînement qui se sont intéressées au lien entre la graphomotricité et l'orthographe lexicale (cf. Kent et Wanzek, 2016). Celles-ci ont analysé les performances orthographiques des élèves indistinctement des caractéristiques lexicales et sous-lexicales des mots (Pontart et al., 2013). En ce sens, elles ne permettent pas d'établir si la relation entre la graphomotricité et l'orthographe, deux processus de bas niveau qui se partagent les ressources cognitives limitées de la mémoire de travail, varie en fonction de la nature et de la complexité des traitements orthographiques. À notre connaissance, cette recherche doctorale est la première à montrer que l'effet *bottom-up* de la graphomotricité, qui se module en fonction de la fréquence et de la consistance des mots, se localise au niveau du *buffer*

graphémique, une instance mémorielle située à l'interface entre les processus centraux et les processus périphériques de l'écriture.

Les conclusions de cette recherche doctorale frayent la voie à d'autres études qui permettront d'approfondir notre compréhension du développement de la graphomotricité et de son rôle dans l'orthographe.

En ce sens, notre troisième étude suggère, en cohérence avec le modèle ACT d'Anderson (1983), une procéduralisation des programmes moteurs atteinte plus précocement en présence de lettres – ou de certaines combinaisons de lettres – tracées et/ou enchaînées plus fréquemment. Afin d'approfondir ce champ de connaissances, une future recherche pourrait analyser si les lettres comprises dans le prénom des élèves sont mieux maîtrisées que d'autres lettres, en évaluant aussi bien la qualité du tracé que sa dynamique; par exemple, il pourrait s'avérer pertinent de déterminer si la lettre « z » est écrite plus lisiblement et plus rapidement, au sein de la chaîne alphabétique ou du mot « zéro », chez une élève qui se prénomme « Zélie » par opposition à une élève qui se prénomme « Lucie ». Similairement, il pourrait être envisageable de comparer les performances graphomotrices des élèves lors de la production de non-mots comportant des enchaînements de lettres plus ou moins rares (e.g. « copubi » vs « ripubi », la fréquence bigrammique du « co » étant plus élevée en français que celle du « ri » en position initiale).

Pour évaluer plus objectivement le degré de procéduralisation des programmes moteurs, qui a été estimé uniquement selon leur fréquence de production (minuscule vs majuscule) ou le niveau scolaire des élèves (première vs troisième vs cinquième années), il serait possible de demander aux participants de produire des lettres ou des mots les yeux ouverts et les yeux fermés (Chartrel et Vinter, 2006). La confrontation de ces conditions expérimentales mettrait en évidence deux modes de contrôle : l'un rétroactif, où l'exécution du mouvement montre une dépendance aux informations visuelles, l'autre proactif, plutôt basé sur une représentation interne de la lettre.

Comme nous l'avons proposé dans les chapitres précédents, l'effet perturbateur de la graphomotricité au cours de la production écrite d'un mot agit sur la stabilité des

représentations orthographiques, récupérées par voie lexicale et/ou calculées par voie sous-lexicale, maintenues temporairement actives dans le *buffer* graphémique, un sous-système de la mémoire de travail. Cette interprétation suscite des questions d'ordre conceptuel et méthodologique quant à la taille de l'« empan graphémique » et à son évaluation clinique. Combien d'unités le *buffer* graphémique peut-il stocker, au cours du développement, en dehors de toute contrainte? Quelle est la nature de ces unités? Comment y sont-elles organisées? À quelle vitesse y déclinent-elles? Dans le cadre de cette recherche doctorale, les capacités mémorielles des participants ont été évaluées par une épreuve d'empan verbal classique recourant à des séries de chiffres en rappels direct et inverse. Les performances à cette épreuve sont reconnues pour mesurer les capacités de stockage et de traitement de la mémoire de travail (Barrouillet et Camos, 2007). L'empan de chiffres correspond-il néanmoins à l'empan graphémique? L'empan visuo-attentionnel, qui équivaut au nombre de lettres qui peuvent être identifiées dans un mot lors d'une seule fixation oculaire, serait-il une mesure plus susceptible de refléter l'empan graphémique, sachant que cette « fenêtre » joue un rôle dans l'acquisition de l'orthographe lexicale (Chaves, Bosse et Largy, 2010; Chaves, Combes, Largy et Bosse, 2012; Chaves, Totereau et Bosse, 2012)?

L'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe a été mis en évidence, au sein de nos trois études, par le biais d'une tâche de dictée ou de rappel immédiat de mots présentés individuellement, les uns à la suite des autres. Afin d'augmenter la validité écologique de nos résultats, il serait pertinent d'évaluer l'influence des traitements graphomoteurs sur les traitements orthographiques en contexte de production d'unités plus larges pour les élèves, notamment lors d'une dictée de phrases. Ce type de tâches permettrait d'évaluer l'impact de la graphomotricité non seulement sur la gestion de l'orthographe lexicale, mais également sur celle de l'orthographe grammaticale. Des études ont montré que les erreurs d'attraction, qui consistent à accorder un verbe avec le nom qui le précède immédiatement et non avec celui auquel il se rapporte (e.g. « Le chien des voisins arrivent »), étaient plus nombreuses lorsque les ressources cognitives mobilisables par les scripteurs étaient limitées (Alamargot et al., 2015; Fayol, Hupet et Largy, 1999; Hupet, Schelstraete, Demaeght et Fayol, 1996; cf. Largy, Cousin et Dédéyan, 2005). Ainsi, il a été montré que la

compétition entre une tâche principale et une tâche secondaire peut empêcher, lorsque nécessaire, l'inhibition de procédures automatiques génératrices d'erreurs (fondées sur des cooccurrences proximales), alors même que des conditions restrictives sont remplies. Dans un tel contexte, il est possible de se demander si le coût cognitif des traitements graphomoteurs est également susceptible de compromettre le contrôle et la supervision des accords sujet-verbe, particulièrement complexes en français. La réponse à cette question nécessitera que des études supplémentaires soient menées; par exemple, des élèves ayant automatisé l'accord de proximité du verbe avec son sujet pourraient produire des phrases sous dictée en lettres minuscules et en lettres majuscules.

L'une des particularités de notre approche méthodologique, contrairement à de nombreuses autres études menées auprès d'élèves du primaire (cf. Afonso et al., 2017; Gonzalez-Martin et al., 2017; Kandel et Perret, 2015; Suarez-Coalla et al., 2018), est d'avoir contrôlé – à plus ou moins deux écarts-types de la moyenne du groupe – les capacités intellectuelles, mémorielles, langagières et sensorimotrices qui entrent en jeu dans le développement de la graphomotricité et de l'orthographe. Les critères d'inclusion qui ont été appliqués dans le cadre de nos trois études permettaient d'exclure les valeurs extrêmes, donnant ainsi une force à nos résultats. Ces derniers doivent néanmoins être relativisés par rapport à une « classe moyenne » d'élèves : les échantillons sont certes homogènes, mais sans doute peu représentatifs des classes ordinaires – et hétérogènes – du Québec et de la France qui intègrent une proportion d'élèves à risque, en difficulté ou en trouble d'apprentissage. Il nous semble dorénavant important de tenir compte des différences inter-individuelles. L'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe pourrait être évalué chez des élèves à besoins particuliers, pour lesquels l'effet risque d'être encore plus marqué. À cet égard, Alamargot et al. (2018) ont montré que les performances déficitaires des élèves sourds profonds congénitaux dans le domaine de l'orthographe et de la production de textes étaient associées significativement à leurs difficultés graphomotrices, souvent négligées au profit de leur déficit phonologique. Rappelons également l'étude de Fayol et Miret (2005) ayant montré que les élèves faibles sur le plan graphomoteur commettaient un nombre plus important d'erreurs orthographiques que les élèves forts lors d'une dictée de phrases. Ainsi,

il convient d'apprécier, à la suite de cette recherche doctorale, le poids de la graphomotricité sur l'orthographe chez des élèves dyslexiques-dysorthographiques ou dyspraxiques, susceptibles de présenter un trouble fonctionnel (i.e. dysgraphie) rendant difficiles l'acquisition et l'automatisation du geste graphomoteur (cf. Alamargot et al., 2014; Brun-Henin et al., 2012; Huau, Velay et Jover, 2015; Jover et al., 2013; Pagliarini et al., 2015; Paz-Villagran et al., 2014; Prunty et al., 2013, 2014). La mise en évidence d'un effet *bottom-up* de la graphomotricité auprès de ces élèves, éprouvé par une étude comparative, motiverait l'instauration d'un entraînement graphomoteur. Celui-ci pourrait comporter des exercices d'écriture variés (e.g. traçage, copie, rappel immédiat ou dictée de lettres, de mots ou de phrases; en minuscules ou en majuscules; lentement ou rapidement; en petite ou grande taille). Pour tirer profit de la technologie, cet entraînement graphomoteur pourrait être réalisé sur un support numérique offrant, contrairement à d'autres études (Berninger et al., 2015; Tanimoto, Thompson, Berninger, Nagy et Abbott, 2015), des rétroactions en temps réel pour l'élève, portant sur la qualité du tracé et les caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur. À notre connaissance, peu d'études ont testé ce type de dispositifs personnalisés. Celle de Chang et Yu (2014), à titre d'exemple, a été menée auprès d'élèves dysgraphiques chinois de première et deuxième années ayant recours à une écriture idéographique. Ces derniers devaient copier une série de sinogrammes sur une tablette graphique, reliée à un ordinateur placé devant eux. Cette interface permettait aux élèves de voir leur tracé reproduit sur l'écran et d'analyser, grâce aux rétroactions visuelles et auditives fournies par le logiciel, la conformité des caractères, la vitesse d'écriture, le nombre de pauses et la pression exercée sur la surface de la tablette. Les performances graphomotrices des élèves se sont améliorées de façon significative au terme de cet entraînement, réalisé pendant 6 semaines à raison de 2 séances de 45 minutes par semaine. Les résultats de cette étude, couplés avec les nôtres et les perspectives de recherche qu'ils soulèvent, appellent de nombreuses questions : un entraînement graphomoteur permettant d'adapter ses modalités aux difficultés graphomotrices spécifiques de chaque élève pourrait-il être conçu et réalisé sur un iPad (avec un stylet), afin d'en faciliter l'implantation en milieu scolaire? Cette aide interactive pourrait-elle améliorer les performances graphomotrices dans une langue alphabétique? Le cas échéant, ses bénéfices pourraient-ils se transférer à l'écriture sur un

support papier et se maintenir dans le temps? Cet outil de remédiation pourrait-il, en allégeant le coût cognitif des traitements graphomoteurs, améliorer les performances orthographiques des élèves? Un tel entraînement pourrait être proposé aux élèves qui manifestent des difficultés graphomotrices, tous niveaux confondus. Il pourrait également être mis en place dès la première année d'apprentissage, afin d'accélérer la procéduralisation des programmes moteurs, nécessaire pour dégager une partie des ressources cognitives du réservoir attentionnel limité.

2. RETOMBÉES POLITIQUES

Nos résultats témoignent du rôle de la graphomotricité dans la production orthographique. Ainsi, son importance, généralement peu prise en compte par les orientations ministérielles (Asher et Estes, 2016; Graham et al., 2013; Labrecque et al., 2013; Leblanc, 2010; Medwell et Wray, 2007, 2008; Vander Hart et al., 2010), devrait être valorisée dans les programmes d'études de la France et particulièrement du Québec, sur lesquels s'appuie la formation initiale. Plus qu'une « technique » (Gouvernement du Québec, 2001, p. 95), la graphomotricité représente une compétence à part entière qui contribue au développement de la compétence « Écrire des textes variés » (*Ibid.*, p. 76) et « Écrire » (Ministère de l'éducation nationale, 2015, p. 12).

Les connaissances ciblées par les programmes d'études devraient miser non seulement sur la qualité du tracé, qui atteint un plateau dès la première année, mais aussi sur sa rapidité et sa fluidité, qui continuent de progresser à la mi-parcours de l'école primaire. Pour l'heure, le temps consacré à l'enseignement-apprentissage de la graphomotricité à l'école est insuffisant pour satisfaire aux exigences de l'automatisation (Bara et al., 2011; Graham et al., 2008; Labrecque et al., 2013; Lavoie et al., 2015). Les documents officiels devraient par ailleurs sensibiliser les enseignants à l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur les processus de plus haut niveau. Puisque l'orthographe représente un défi de taille pour les élèves, les enseignants y accordent une attention plus soutenue en classe, en négligeant souvent – parce que méconnue – la charge cognitive des traitements graphomoteurs. Or, ces

derniers sont également mobilisés au cours de la plupart des activités d'écriture, pouvant ainsi interagir avec les performances orthographiques et/ou rédactionnelles des élèves.

Les avancées méthodologiques dans le domaine de la psychologie cognitive, qui permettent aujourd'hui d'analyser les caractéristiques spatio-temporelles du geste graphomoteur, devraient être mises au service de l'évaluation et de l'enseignement de l'écriture. Ces mesures pourraient compléter les appréciations qualitatives du tracé (i.e. la « calligraphie » et les erreurs d'orthographe), qui sont traditionnellement prises en compte dans le milieu scolaire, afin d'évaluer l'efficacité des traitements graphomoteurs et orthographiques et mieux comprendre les stratégies mobilisées par les élèves en cours de production. Ce changement de paradigme nécessitera toutefois une refonte des programmes d'études et des programmes de formation à l'enseignement, afin de mieux soutenir les élèves dans le développement de la compétence à écrire; tenir compte de ces préconisations contribuerait à réduire le fossé – discuté en problématique – qui perdure entre la recherche et la pratique en éducation.

3. RETOMBÉES ÉDUCATIVES

Le design expérimental de notre deuxième étude confirme que les erreurs commises par les élèves lors de la production écrite d'un mot ne sont pas toujours causées par des difficultés orthographiques (i.e. procédures phonologique et/ou lexicale déficitaires), mais peuvent être le reflet d'une demande cognitive trop importante entraînant un « défaut de performance » (Bonin, 2003; Schelstraete et Maillart, 2004). Des traitements graphomoteurs trop coûteux sont en effet susceptibles d'entraîner un déclin des traces orthographiques stockées dans le *buffer* graphémique. Cet effet *bottom-up* de la graphomotricité devrait inciter les professionnels de l'éducation à toujours évaluer l'efficacité des processus graphomoteurs et des processus orthographiques chez les élèves, de façon à déterminer la cause fonctionnelle des erreurs. Celles-ci pourraient en effet cacher, pour un certain nombre d'élèves, des difficultés graphomotrices sous-jacentes. Le dépistage pourrait se faire en comparant les performances orthographiques des élèves dans différentes modalités de production (e.g. écriture manuscrite, écriture dactylographique, manipulation de lettres mobiles, épellation

orale). Améliorer le niveau orthographique des élèves supposerait parfois une intervention dans le domaine de la graphomotricité et non dans celui de l'orthographe. Ce constat soulève, sur le plan éducatif, deux questions d'ordre pratique : comment les enseignants peuvent-ils évaluer les habiletés graphomotrices de leurs élèves? Quels moyens pédagogiques peuvent-ils mettre en place pour réduire le coût cognitif des traitements graphomoteurs au profit des traitements orthographiques?

Afin de cibler les élèves qui présentent des difficultés graphomotrices, les enseignants pourraient recourir au rappel écrit du prénom et à celui de la chaîne alphabétique. Ces tâches pourraient être réalisées dans un temps limité afin d'en faciliter la passation collective (e.g. écrire le plus de lettres possible en 30 secondes). Elles permettraient aux enseignants d'évaluer *a posteriori* la conformité des lettres en rapport à un modèle allographique (i.e. analyse du produit) et la fluence de production graphomotrice (i.e. analyse du processus), dans le but d'accorder plus de temps et d'attention aux élèves dont les productions se montrent peu lisibles et/ou peu rapides. Enregistrer les mouvements d'écriture des élèves sur une tablette graphique ou sur un iPad – dans le cas où de tels outils sont disponibles à l'école – affinerait cette analyse; cette approche permettrait de faire un enseignement différencié de la forme et du tracé de chacune des lettres, selon leur niveau de procéduralisation. Quelle qu'en soit la méthode, une évaluation systématique de la graphomotricité à quelques reprises au cours de l'année scolaire permettrait d'intervenir de façon plus soutenue auprès des élèves à risque ou en difficulté, selon les trois paliers (universel, ciblé, intensif) du modèle de réponse à l'intervention (Desrochers, Laplante et Brodeur, 2015). En supposant qu'il revient aux enseignants de dépister en première ligne les élèves dont les habiletés graphomotrices ne progressent pas de façon satisfaisante, la responsabilité des interventions individuelles ou en sous-groupes de besoins offre matière à discussion : à quel professionnel la remédiation du geste d'écriture revient-elle dans le milieu scolaire? Accroître la collaboration entre les enseignants titulaires et les autres intervenants (enseignants spécialisés, orthopédagogues, orthophonistes, ergothérapeutes, psychomotriciens) semble indispensable afin d'apporter une meilleure réponse aux difficultés d'apprentissage qu'éprouvent certains élèves.

Afin de réduire l'effet *bottom-up* de la graphomotricité sur l'orthographe, deux pôles d'interventions pédagogiques (ou orthopédagogiques) complémentaires nous apparaissent pertinents. D'une part, soutenir le développement des habiletés graphomotrices par le biais d'un entraînement spécifique, ce qui suppose une pratique fréquente et diversifiée en vue d'assurer l'automatisation des programmes moteurs (Anderson, 1983). Sur ce point, de nombreuses techniques, démontrées efficaces par la recherche, proposent de renforcer le lien entre la perception et l'action afin d'améliorer la qualité et la vitesse du tracé; par exemple, recourir à un enseignement explicite des lettres, à la guidance motrice, à des modèles visuels comportant des flèches et des numéros précisant l'ordre et la direction des traits à former, à l'exploration multisensorielle, à l'auto-verbalisation et à l'auto-évaluation (Bara et Gentaz, 2011; Berninger et al., 2015; Graham et al., 2000; Kaiser, Albaret et Doudin, 2011; Lavoie et Morin, 2016; cf. Hoy, Egan et Feder, 2011; Santangelo et Graham, 2016). Les élèves pourraient également s'entraîner à l'écriture de mots fréquents, afin d'en automatiser le tracé et l'orthographe (i.e. former des *chunks* qui minimiseront les coûts de maintien et de traitement). D'autre part, développer les stratégies métacognitives des élèves, afin de favoriser une gestion efficace des processus graphomoteurs et orthographiques malgré les contraintes exercées par la mémoire de travail. Ces stratégies, faisant appel à l'anticipation, à la planification, au contrôle et à l'évaluation, pourraient être les suivantes : je prédis l'orthographe d'un mot, je l'épelle, je visualise l'ordre de ses lettres, je les trace dans ma tête, je les écris, je vérifie si ce que j'ai écrit correspond à ma prédiction, j'évalue ma réussite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbott, R.D. et Berninger, V. (1993). Structural equation modeling of relationships among developmental skills in primary- and intermediate-grade writers. *Journal of Educational Psychology*, 85, 478-508. doi:10.1037/0022-0663.85.3.478
- Abbott, R.D., Berninger, V.W. et Fayol, M. (2010). Longitudinal relationships of levels of language in writing and between writing and reading in grades 1 to 7. *Journal of Educational Psychology*, 102(2), 281-298. doi:10.1037/a0019318
- Accardo, A.P., Genna, M. et Borean, M. (2013). Development, maturation and learning influence on handwriting kinematics. *Human Movement Science*, 32, 136-146. doi:10.1016/j.humov.2012.10.004
- Afonso, O., Alvarez C., et Kandel, S. (2015). Effects of Grapheme-to-Phoneme probability on writing durations. *Memory & Cognition*, 43, 579-492. doi:10.3758/s13421-014-0489-8
- Afonso, O., Suarez-Coalla, P. et Cuetos, F. (2015). Spelling impairments in Spanish dyslexic adults. *Frontiers in Psychology*, 6(466), 1-10. doi:10.3389/fpsyg.2015.00466
- Afonso, O., Suarez-Coalla, P., Gonzalez-Martin, N. et Cuetos, F. (2017). The impact of word frequency on peripheral processes during handwriting: a matter of age. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(3), 695-703. doi:10.1080/17470218.2016.1275713
- Aghababian, V. et Nazir, T.A. (2000). Developing normal reading skills: aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76, 123-150. doi:10.1006/jecp.1999.2540
- Alamargot, D. (1997). *Processus de récupération et d'organisation dans l'activité de rédaction de textes : effets de l'acquisition de connaissances référentielles*. Thèse de doctorat en psychologie, Université de Poitiers, France.
- Alamargot, D. (2001). L'acquisition des connaissances. In C. Golder et D. Gaonac'h (Eds.), *Enseigner à des adolescents. Manuel de Psychologie* (p. 78-113). Paris : Hachette Education.
- Alamargot, D. (2007). Développement de la mémoire : impact sur l'apprentissage de la production écrite. *Entretiens d'orthophonie*, 1, 1-9.
- Alamargot, D. et Chanquoy, L. (2001). *Through the models of writing*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers.
- Alamargot, D., Chesnet, D. et Caporossi, G. (2012). Using Eye and Pen movements to study the writing process. In V.W. Berninger (Éd.), *Past, present, and future contributions*

- of cognitive writing research to cognitive psychology* (p. 315-337). New York: Psychology press.
- Alamargot, D., Chesnet, D., Dansac, C. et Ros, C. (2006). Eye and Pen: A new device for studying reading during writing. *Behavior Research Methods*, 38(2), 287-299. doi: 10.3758/BF03192780
- Alamargot, D., Flouret, L., Larocque, D., Caporossi, G., Pontart, V., Paduraru, C., Morisset, P. et Fayol, M. (2015). Successful written subject-verb agreement: an online analysis of the procedure used by students in Grades 3, 5 and 12. *Reading and Writing*, 28, 291-312. doi:10.1007/s11145-014-9525-0
- Alamargot, D., Flouret, L., Pontart, V., Morisset, P., Larocque, D. et Caporossi, G. (2012). Évolution de la procédure d'accord sujet-verbe en production écrite. Exemple d'une étude en « temps réel » menée chez des élèves de CE2, CM2, 4ème et Terminale. In FNAME (Ed.), *Inégalités scolaires et résilience : sociologie des inégalités scolaires - l'école, lieu de résilience - nouvelles pratiques d'écriture* (p. 279-293). Éditions de Retz.
- Alamargot, D., Lambert, E. et Chanquoy, L. (2005). La production écrite et ses relations avec la mémoire. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 81, 41-46.
- Alamargot, D. et Morin, M.-F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between Grades Two and Nine. *Human Movement Science*, 44, 32-41. doi:10.1016/j.humov.2015.08.011
- Alamargot, D., Morin, M.-F., Pontart, V., Maffre, L., Flouret, L. et Simard-Dupuis, É. (2014). Les enfants dyslexiques ont-ils des difficultés graphomotrices? *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 128, 59-67.
- Alamargot, D., Morin, M.-F. et Simard-Dupuis, É. (2018). Handwriting in signing deaf middle-school students and relationship with text composition and spelling. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 31, 1017-1038. doi:10.1007/s11145-018-9824-y
- Alamargot, D., Morin, M.-F. et Simard-Dupuis, É. (sous presse). Handwriting delay in children with dyslexia at the end of primary school. *Journal of learning disabilities*.
- Alamargot, D., Plane, S., Lambert, E. et Chesnet, D. (2010). Using eye and pen movements to trace the development of writing expertise: case studies of a 7th, 9th and 12th grader, graduate student, and professional writer. *Reading and Writing*, 23(7), 853-888. doi:10.1007/s11145-009-9191-9

- Albaret, J.-M., Kaiser, M.-L. et Soppelsa, R. (2013). Troubles de l'écriture chez l'enfant. In J.-M. Albaret, M.-L. Kaiser et R. Soppelsa (Eds.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : Des modèles à l'intervention* (p. 155-173). Bruxelles : De Boeck/Solal.
- Alegria, J. et Mousty, P. (1997). Processus lexicaux impliqués dans l'orthographe d'enfants francophones présentant des troubles de la lecture. In L. Rieben, M. Fayol et C.A. Perfetti (Eds.), *Des orthographes et leur acquisition* (p. 167-180). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Alves, R.A., Branco, M., Castro, S.L. et Olive, T. (2012). Effects of handwriting skill, handwriting and dictation modes, and gender of fourth graders on pauses, written language bursts, fluency, and quality. In V.W. Berninger (Ed.), *Past, present, and future contributions of cognitive writing research to cognitive psychology* (p. 389-402). New York: Psychology Press.
- Alves, R.A. et Limpo, T. (2015). Progress in written language bursts, pauses, transcription, and written composition across schooling. *Scientific Studies of Reading*, 19(5), 374-391. doi:10.1080/10888438.2015.1059838
- Amundson, S.J. (1995). *Evaluation Tool of Children's Handwriting: ETCH examiner's manual*. Homer, AK: OT Kids.
- Anderson, J.R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89(4), 369-406. doi:10.1037/0033-295X.89.4.369
- Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press. doi:10.1016/0004-3702(86)90084-6
- Anderson, J.R. (1992). Automaticity and the ACT theory. *The American Journal of Psychology*, 105(2), 165-180. doi:10.2307/1423026
- Anderson, J.R. (1996). ACT: a simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, 51(4), 355-365. doi:10.1037/0003-066X.51.4.355
- Anderson, J.R. (2000). *Learning and memory. An integrated approach* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Anderson, J.R. et Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, NJ: Laurence Erlbaum Associated.
- Asher, A. (2006). Handwriting instruction in elementary schools. *American Journal of Occupational Therapy*, 60(4), 461-471. doi:10.5014/ajot.60.4.461
- Asher, A.M.A. et Estes, J. (2016). Handwriting instruction in elementary schools: Revisited!, *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early intervention*, 9(4), 353-365. doi:10.1080/19411243.2016.1239560

- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F. et Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence: a neuroscience approach. *Clinical Neurophysiology*, 44, 3-12. doi:10.1016/j.neucli.2013.10.125
- Atkinson, R.C. et Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: a proposed system and its control process. *Psychology of learning and motivation*, 2, 89-195. doi:10.1016/S0079-7421(08)60422-3
- Bara, F. et Bonneton-Botté, N. (2015). Est-il nécessaire d'enseigner le sens du tracé des lettres en capitale d'imprimerie en maternelle? *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 139, 1-10.
- Bara, F. et Gentaz, E. (2010). Apprendre à tracer les lettres : une revue critique. *Psychologie française*, 55, 129-144. doi:10.1016/j.psfr.2010.01.001
- Bara, F. et Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, 30, 745-759. doi:10.1016/j.humov.2010.05.015
- Bara, F. et Morin, M.-F. (2013). Does the handwriting style learned in first grade determine the style used in the fourth and fifth grades and influence handwriting speed and quality? A comparison between French and Quebec children. *Psychology in the Schools*, 50(6), 601-617. doi:10.1002/pits.21691
- Bara, F., Morin, M.-F., Alamargot, D. et Bosse, M.-L. (2016). Learning different allographs through handwriting: the impact on letter knowledge and reading acquisition. *Learning and Individual Differences*, 45, 88-94. doi:10.1016/j.lindif.2015.11.020
- Bara, F., Morin, M.-F., Montésinos-Gelet, I. et Lavoie, N. (2011). Conceptions et pratiques en graphomotricité chez des enseignants de primaire en France et au Québec. *Revue française de pédagogie*, 176, 41-56. doi:10.4000/rfp.3154
- Barrientos, P. (2016). Handwriting development in Spanish children with and without learning disabilities: A graphonomic approach. *Journal of learning disabilities*, 1-12. doi:10.1177/0022219416633866
- Barrouillet, P. et Camos, V. (2007). Le développement de la mémoire de travail. In S. Ionescu et A. Blanchet (Eds.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (p. 51-86). Paris : Presses Universitaires de France.
- Beers, S.F., Mickail, T., Abbott, R. et Berninger, V. (2017). Effects of transcription ability and transcription mode on translation: Evidence from written compositions, language bursts and pauses when students in grades 4 to 9, with and without persisting dyslexia or dysgraphia, compose by pen or by keyboard. *Journal of Writing Research*, 9(1), 1-25. doi:10.17239/jowr-2017.09.01.01

- Beery, K.E. et Beery, N.A. (2004). *The Beery-Buktenica Developmental Test of Visual-Motor Integration. Administration, scoring and teaching manual* (5th ed.). Minneapolis, MN: NCS Pearson.
- Bereiter, C. et Scardamalia, M. (1987). *The psychology of written composition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Berninger, V. (2000). Development of language by hand and its connections with language by ear, mouth, and eye. *Topics in language disorders*, 20(4), 65-84. doi:10.1097/00011363-200020040-00007
- Berninger, V.W., Abbott, R.D., Augsburger, A. et Garcia, N. (2009). Comparison of pen and keyboard transcription modes in children with and without learning disabilities. *Learning Disability Quarterly*, 32(3), 123-141. doi:10.2307/27740364
- Berninger, V. et Amtmann, D. (2003). Preventing written expression disabilities through early and continuing assessment and intervention for handwriting and/or spelling problems: Research into practice. In H.L. Swanson, K. Harris et S. Graham (Eds.), *Handbook of Research on Learning Disabilities* (p. 345-363). New York: Guilford.
- Berninger, V.W., Nagy, W., Tanimoto, S., Thompson, R. et Abbott, R.D. (2015). Computer instruction in handwriting, spelling, and composing for students with specific learning disabilities in grades 4-9. *Computers & Education*, 81, 154-168. doi:10.1016/j.compedu.2014.10.005
- Berninger, V., Vaughan, K., Abbott, R.D., Begay, K., Coleman, K.B., Curtin, G., Hawkins, J.M. et Graham, S. (2002). Teaching spelling and composition alone and together: Implications for the simple view of writing. *Journal of Educational Psychology*, 94(2), 291-304. doi:10.1037/0022-0663.94.2.291
- Berninger, V., Yates, C., Cartwright, A., Rutberg, J., Remy, E. et Abbott, R. (1992). Lower-level developmental skills in beginning writing. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 4, 257-280. doi:10.1007/BF01027151
- Blaser, C. (2007). *Fonction épistémique de l'écrit : pratiques et conceptions d'enseignants de sciences et d'histoire du secondaire*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- Bloemsaat, G., Van Galen, G.P. et Meulenbroek, R.G.J. (2003). Lateralized effects of orthographical irregularity and auditory memory load on the kinematics of transcription typewriting. *Psychological Research*, 67, 123-133. doi:10.1007/s00426-002-0112-7
- Blöte, A.W. et Hamstra-Bletz, L. (1991). A longitudinal study on the structure of handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 72, 983-994. doi:10.2466/pms.1991.72.3.983

- Bonin, P. (2003). *Production verbale de mots. Approche cognitive*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Bonin, P., Collay, S. et Fayol, M. (2008). La consistance orthographique en production verbale écrite : une brève synthèse. *L'année psychologique*, 108, 517-546. doi:10.4074/S0003503308003059
- Bonin, P. et Delattre, M. (2010). La procédure de conversion phonie-graphie en production sous dictée. *L'année psychologique*, 110, 495-516. doi: 10.4074/S000350331000401X
- Bonin, P. et Fayol, M. (1996). L'étude en temps réel de la production du langage écrit : pourquoi et comment? *Étude de Linguistique Appliquée*, 101(1), 8-19.
- Bonin, P., Laroche, B. et Perret, C. (2016). Locus of word frequency effects in spelling to dictation: still at the orthographic level! *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 42(11), 1814-1820. doi:10.1037/xlm0000278
- Bonin, P., Méot, A., Lagarrigue, A. et Roux, S. (2015). Written object naming, spelling to dictation, and immediate copying: Different tasks, different pathways? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(7), 1268-1294. doi:10.1080/17470218.2014.978877
- Bonneton-Botté, N., Beucher-Marsal, C., Bara, F., Muller, J., Le Corf, L., Quéméneur, M. et Dare, M. (2019). Teaching cursive handwriting: A contribution to the acceptability study of using digital tablets in French classrooms. *Journal of Early Childhood Literacy*, 1-24. doi:10.1177/1468798419838587
- Bosga-Stork, I.M, Bosga, J., Ellis, J.L. et Meulenbroek, R.G.J. (2015). Developing interactions between language and motor skills in the first three years of formal handwriting education. *British Journal of Education, Society & Behavioural Science*, 12(1), 1-13. doi:10.9734/BJESBS/2016/20703
- Bosse, M.-L., Chaves, N. et Valdois, S. (2014). Lexical Orthography Acquisition: Is Handwriting Better than Spelling Aloud? *Frontiers in Psychology*, 5(56). doi:10.3389/fpsyg.2014.00056
- Bosse, M.-L., Valdois, S. et Tainturier, M.-J. (2003). Analogy without priming in early spelling development. *Reading and Writing: And Interdisciplinary Journal*, 16, 693-716. doi:10.1023/A:1025883815395
- Both-de Vries, A. C. et Bus, A.G. (2010). The proper name as starting point for basic reading skills. *Reading and Writing*, 23, 173-187. doi:10.1007/s11145-008-9158-2
- Bourdin, B. (1999). Mémoire de travail et production langagière : comparaison de l'oral et de l'écrit chez les adultes et les enfants. *L'année psychologique*, 99(1), 123-148. doi:10.3406/psy.1999.28551

- Bourdin, B., Cogis, D. et Foulin, J.-N. (2010). Influence des traitements graphomoteurs et orthographiques sur la production de textes écrits : perspective pluridisciplinaire. *Langages*, 177, 61-86. doi:10.3917/lang.177.0057
- Bourdin, B. et Fayol, M. (1994). Is written production more difficult than oral production: A working memory approach. *International Journal of Psychology*, 29, 591-620. doi:10.1080/00207599408248175
- Bourdin, B. et Fayol, M. (2002). Even in adults, written production is still more costly than oral production. *International Journal of Psychology*, 37, 219-222. doi:10.1080/00207590244000070
- Bowey, J.A. et Muller, D. (2005). Phonological recoding and rapid orthographic learning in third-graders' silent reading: A critical test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 92, 203-219. doi:10.1016/j.jecp.2005.06.005
- Brun-Henin, F., Velay, J.-L., Beecham, Y. et Cariou, S. (2012). Troubles d'écriture et dyslexie : revue théorique, aspects cliniques et approche expérimentale. *Développement*, 4(13), 4-28. doi:10.3917/devel.013.0004
- Buchwald, A. et Rapp, B. (2009). Distinctions between orthographic long-term memory and working memory. *Cognitive Neuropsychology*, 26(8), 724-751. doi:10.1080/02643291003707332
- Camos, V. et Barrouillet, P.N. (2014). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie française*, 59(1), 21-39. doi:10.1016/j.psfr.2012.12.003
- Caporossi, G. et Alamargot, D. (2014). L'écriture manuscrite : analyse comparative et méthodes d'études en temps réel. L'exemple du logiciel Eye and Pen. In C. Leblay et G. Caporossi (Eds.), *Le temps de l'écriture : enregistrements et représentations*. Coll. « Sciences du langage : carrefours et points de vue ». Louvain-la-Neuve : Academia-Bruylant.
- Caramazza, A., Miceli, G., Villa, G. et Romani, C. (1987). The role of the graphemic buffer in spelling: evidence from a case of acquired dysgraphia. *Cognition*, 26, 59-85. doi:10.1016/0010-0277(87)90014-X
- Cassar, M. et Treiman, R. (1997). The beginnings of orthographic knowledge: Children's knowledge of double letters in words. *Journal of Educational Psychology*, 89(4), 631-644. doi:10.1037/0022-0663.89.4.631
- Catach, N. (2003). *L'orthographe française* (3^e éd.). Paris : Armand Colin.
- Chang, S.-H. et Yu, N.-Y. (2014). The effect of computer-assisted therapeutic practice for children with handwriting deficit: A comparison with the effect of the traditional sensorimotor approach. *Research in Developmental Disabilities*, 35, 1648-1657. doi:10.1016/j.ridd.2014.03.024

- Chanquoy, L. et Alamargot, D. (2002). Mémoire de travail et rédaction de textes : évolution des modèles et bilan des premiers travaux. *L'année psychologique*, 102(2), 363-398. doi:10.3406/psy.2002.29596
- Chanquoy, L. et Alamargot, D. (2003). Mise en place et développement des traitements rédactionnels : le rôle de la mémoire de travail. *Le Langage et l'Homme*, XXXVIII(2), 1-20.
- Chartrand, S.-G. et Prince, M. (2009). La dimension affective du rapport à l'écrit d'élèves québécois. *Canadian Journal of Education*, 32(2), 317-343.
- Chartrel, E. et Vinter, A. (2004). L'écriture : une activité longue et complexe à acquérir. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 78, 174-180.
- Chartrel, E. et Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'année psychologique*, 106, 43-64. doi:10.4074/S0003503306001047
- Chartrel, E. et Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and Instruction*, 18, 537-547. doi:10.1016/j.learninstruc.2007.11.003
- Chaves, N., Bosse, M.-L. et Largy, P. (2010). Le traitement visuel est-il impliqué dans l'acquisition de l'orthographe lexicale? *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant* (ANAE), 107, 133-141.
- Chaves, N., Combes, C., Largy, P. et Bosse, M.-L. (2012). La mémorisation de l'orthographe des mots lus en CM2 : effet du traitement visuel simultané. *L'année psychologique*, 112, 175-196. doi:10.4074/S0003503312002011
- Chaves, N., Totereau, C. et Bosse, M.-L. (2012). Acquérir l'orthographe lexicale : quand savoir lire ne suffit pas. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 118, 271-279.
- Chesnet, D. et Alamargot, D. (2005). Analyse en temps réel des activités oculaires et graphomotrices du scripteur : intérêt du dispositif « Eye and Pen ». *L'année psychologique*, 105(3), 477-520. doi:10.3406/psy.2005.29706
- Christensen, C.A. (2005). The role of orthographic-motor integration in the production of creative and well-structured written text for students in secondary school. *Educational Psychology*, 25(5), 441-453. doi:10.1080/01443410500042076
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R. et Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204-256. doi:10.1037/0033-295X.108.1.204

- Connelly, V., Dockrell, J.E. et Barnett, J. (2005). The slow handwriting of undergraduate students constrains overall performance in exam essays. *Educational Psychology*, 25(1), 99-107. doi:10.1080/0144341042000294912
- Connelly, V., Gee, D. et Walsh, E. (2007). A comparison of keyboarded and handwritten compositions and the relationship with transcription speed. *British Journal of Educational Psychology*, 77(2), 479-492. doi:10.1348/000709906X116768
- Cossu, G., Gugliotta, M. et Marshall, J.C. (1995). Acquisition of reading and written spelling in a transparent orthography: two non-parallel processes? *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 7, 9-22. doi:10.1007/BF01026945
- Costa, V., Fischer-Baum, S., Capasso, R., Miceli, G. et Rapp, B. (2011). Temporal stability and representational distinctiveness: key functions of orthographic working memory. *Cognitive Neuropsychology*, 28(5), 338-362. doi:10.1080/02643294.2011.648921
- Cunningham, A.E. (2006). Accounting for children's orthographic learning while reading text: do children self-teach? *Journal of Experimental Child Psychology*, 95, 56-77. doi:10.1016/j.jecp.2006.03.008
- Cunningham, A.E., Perry, K.E., Stanovich, K.E. et Share, D.L. (2002). Orthographic learning during reading: examining the role of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 185-199. doi:10.1016/S0022-0965(02)00008-5
- Cunningham, A.E. et Stanovich, K.E. (1990). Early spelling acquisition: writing beats the computer. *Journal of Educational Psychology*, 82(1), 159-162. doi:10.1037/0022-0663.82.1.159
- Daigle, D., Ammar, A. et Montésinos-Gelet, I. (2013). *Compétence orthographique et dysorthographie : rôles des procédures explicites*. Rapport de recherche adressé au FRQ-SC (2010-ER-136836), Université de Montréal, Québec, Canada.
- Damian, M.F. et Stadhagen-Gonzalez, H. (2009). Advance planning of form properties in the written production of single and multiple words. *Language and Cognitive Processes*, 24(4), 555-579. doi:10.1080/01690960802346500
- Danna, J. et Velay, J.-L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology*, 6(169), 1-11. doi:10.3389/fpsyg.2015.00169
- Danna, J. et Velay, J.-L. (2017). Handwriting movement sonification: why and how? *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(2), 299-303. doi:10.1109/THMS.2016.2641397
- Danna, J., Velay, J.-L. et Albaret, J.-M. (2016). Les dysgraphies. In S. Pinto et M. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique : du cerveau au langage* (p. 337-346). Louvain-la-Neuve : De Boeck.

- De Ajuriaguerra, J., Auzias, M. et Denner, A. (1971). *L'écriture de l'enfant (Tome I). L'évolution de l'écriture et ses difficultés*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. France : Éditions Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2011). *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe*. France : Éditions Odile Jacob.
- Delahaie, M. (2009). *L'évolution du langage de l'enfant. De la difficulté au trouble*. Saint-Denis : Édition Jeanne Herr.
- Delattre, M., Bonin, P. et Barry, C. (2006). Written spelling to dictation: sound-to-spelling regularity affects both writing latencies and durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1330-1340. doi:10.1037/0278-7393.32.6.1330
- Demont, É. et Gombert, J.-É. (2004). L'apprentissage de la lecture : évolution des procédures et apprentissage implicite. *Enfance*, 56(1), 245-257. doi:10.3917/enf.563.0245
- De Partz, M.-P. (2018). Les troubles du buffer graphémique : de la théorie cognitive à l'évaluation clinique. *Rééducation Orthophonique*, 274, 147-168.
- Desrochers, A., Laplante, L. et Brodeur, M. (2015). Le modèle de réponse à l'intervention et la prévention des difficultés d'apprentissage de la lecture au préscolaire et au primaire. In M.-F. Morin, D. Alamargot et C. Gonçalves (Eds.), *Perspectives actuelles sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture/ Contributions about learning to read and write* (p. 290-314). Sherbrooke : Éditions de l'Université de Sherbrooke. doi:10.17118/11143/10274
- Doutriaux, F. et Lepez, R. (1980). *TNO : Test de Niveau Orthographique*. Paris : ECPA.
- Écalte, J. (2004). Les connaissances des lettres et l'écriture du prénom chez l'enfant français avant l'enseignement formel de la lecture-écriture. *Psychologie canadienne*, 45(1), 111-119. doi:10.1037/h0086975
- Écalte, J. et Magnan, A. (2015). *L'apprentissage de la lecture et ses difficultés*. Paris : Dunod.
- Ehri, L. (1997). Apprendre à lire et apprendre à orthographier, c'est la même chose, ou pratiquement la même chose. In L. Rieben, M. Fayol et C.A. Perfetti (Eds.), *Des orthographes et leur acquisition* (p. 231-265). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Ellis, A.W. (1982). Spelling and writing (and reading and speaking). In A.W. Ellis (Ed.), *Normality and pathology in cognitive functions* (p. 113-146). New York: Academic Press.
- Ellis, A.W. (1988). Normal writing processes and peripheral acquired dysgraphias. *Language and Cognitive Processes*, 3, 99-127. doi:10.1080/01690968808402084

- Ellis, N. (1997). Acquisition interactive de la lecture et de l'orthographe : étapes, stratégies et échanges de connaissances. In L. Rieben, M. Fayol et C.A. Perfetti (Eds.), *Des orthographes et leur acquisition* (p. 267-292). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Favart, M. et Olive, T. (2005). Modèles et méthodes d'étude de la production écrite. *Psychologie française*, 50, 273-285. doi:10.1016/j.psfr.2005.05.012
- Fayol, M. (2013). *L'acquisition de l'écrit*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Fayol, M., Foulin, J.-N., Maggio, S. et Lété, B. (2009). Towards a dynamic approach of how children and adults manage text production. In E. Grigorenko, E. Mambrino et D.D. Preiss (Eds.), *Handbook of writing: a mosaic of perspectives* (p. 141-158). New York: Psychology press.
- Fayol, M., Hupet, M. et Largy, P. (1999). The acquisition of subject-verb agreement in written French: From novices to experts' errors. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 11(2), 153-174.
- Fayol, M. et Jaffré, J.-P. (2008). *Orthographier*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Fayol, M., Largy, P. et Lemaire, P. (1994) Cognitive overload and orthographic errors: When cognitive overload enhances subject-verb agreement errors. A study in French written language. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, Section A: Human Experimental Psychology*, 47(2), 437-464. doi:10.1080/14640749408401119
- Fayol, M. et Lété, B. (2012). Contributions of online studies to understanding translation from ideas to written text. In M. Fayol, D. Alamargot et V. Berninger (Eds.), *Translation of thoughts to written text while composing: advancing theory, knowledge, methods, and applications* (p. 289-313). New York: Psychology press.
- Fayol, M. et Miret, A. (2005). Écrire, orthographier et rédiger des textes. *Psychologie française*, 50, 391-402. doi:10.1016/j.psfr.2005.05.008
- Fayol, M., Toczek-Capelle, M.-C., de Labareyre, S. et Caillaud, E. (2006). Une brève épreuve d'évaluation des performances en morphologie flexionnelle écrite. *Rééducation orthophonique*, 225, 75-90.
- Feder, K.P. et Majnemer, A. (2007). Handwriting development, competency, and intervention. *Development Medicine & Child Neurology*, 49, 312-317. doi:10.1111/j.1469-8749.2007.00312.x
- Feng, L., Lindner, A., Ji, X.R. et Joshi, R.M. (2017). The roles of handwriting and keyboarding in writing: a meta-analytic review. *Reading and Writing*, 1-31. doi:10.1007/s11145-017-9749-x
- Ferrand, L., Lété, B. et Thevenot, C. (2018). *Psychologie cognitive des apprentissages scolaires*. Malakoff : Dunod.

- Ferrel-Chapus, C., Hay, L., Olivier, I., Bard, C. et Fleury, M. (2002). Visuomanual coordination in childhood: adaptation to visual distortion. *Experimental Brain Research*, 144, 506-517. doi:10.1007/s00221-002-1064-2
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS* (3rd ed.). London: SAGE publications Ltd.
- Fitts, P.M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A.W. Melton (Ed.), *Categories of human learning* (p. 243-285). New York: Academic Press.
- Fitzgerald, J. et Shanahan, T. (2000). Reading and writing relations and their development. *Educational Psychologist*, 35(1), 39-50. doi:10.1207/S15326985EP3501_5
- Fitzpatrick, P., Vander Hart, N. et Cortesa, C. (2013). The influence of instructional variables and task constraints on handwriting performance. *The Journal of Educational Research*, 106, 216-234. doi:10.1080/00220671.2012.692730
- Foulin, J.-N. (1995). Pauses et débits : les indicateurs temporels de la production écrite. *L'année psychologique*, 95(3), 483-504. doi:10.3406/psy.1995.28844
- Foulin, J.-N. et Fayol, M. (1988). Étude en temps réel de la production écrite chez des enfants de sept et huit ans. *European journal of psychology of education*, 3(4), 461-475. doi:10.1007/BF03172667
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, M. Coltheart et J. Marshall (Eds.), *Surface dyslexia* (p. 301-330). London: Erlbaum.
- Galbraith, D. (1999). Writing as a knowledge constituting process. In M. Torrance et D. Galbraith (Eds.), *Knowing what to write: conceptual processes in the generation, selection and development of ideas during text production* (p. 139-160). Amsterdam: Amsterdam University Press.
- Gerth, S., Dolk, T., Klassert, A., Fliesser, M., Fisher, M.H., Nottbush, G. et Festman, J. (2016a). Adapting to the surface: a comparison of handwriting measures when writing on a tablet computer and on paper. *Human Movement Science*, 48, 62-73. doi:10.1016/j.humov.2016.04.006
- Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M.H., Nottbusch, G. et Festman, J. (2016b). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second Graders', and adults' writing performance on a tablet vs. paper. *Frontiers in Psychology*, 7(1308), 1-18. doi:10.3389/fpsyg.2016.01308
- Giasson, J. (2011). *La lecture – apprentissage et difficultés*. Québec : Gaëtan Morin Éditeur.
- Gonzalez-Martin, N., Suarez-Coalla, P., Afonso, O. et Cuetos, F. (2017). A study of writing mechanisms in Spanish primary education children. *Infancia y Aprendizaje*, 40(1), 88-119. doi:10.1080/02103702.2016.1263448

- Goodman, R.A. et Caramazza, A. (1986). Dissociation of spelling errors in written and oral spelling: the role of allographic conversion in writing. *Cognitive Neuropsychology*, 3(2), 179-206. doi:10.1080/02643298608252675
- Gouvernement du Canada (2016). *À la hauteur : résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE. Le rendement des jeunes du Canada en sciences, en lecture et en mathématiques*. Canada : Conseil des ministres de l'Éducation.
- Gouvernement du Québec (1987). *La qualité du français à l'école : une responsabilité partagée*. Québec : Conseil supérieur de l'éducation.
- Gouvernement du Québec (2001). *Programme de formation de l'école québécoise : Enseignement primaire*. Québec : Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Gouvernement du Québec (2009). *Programme de formation de l'école québécoise : Progression des apprentissages au primaire*. Québec : Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Gouvernement du Québec (2013). Doit-on maintenir l'écriture script et l'écriture cursive? *Bulletin Langue et Culture*, 4. Document téléaccessible à l'adresse <<http://www.education.gouv.qc.ca/enseignants/pfeq/primaire/domaine-des-langues/francais-langue-denseignement/>>.
- Gouvernement du Québec (2015). *Les compétences en littératie, en numératie et en résolution de problèmes dans des environnements technologiques : des clefs pour relever les défis du XXI^e siècle. Rapport québécois du Programme pour l'évaluation internationale des compétences des adultes (PEICA)*. Québec : Institut de la statistique du Québec.
- Gouvernement du Québec (2016). *Indices de défavorisation des écoles publiques. Écoles primaires et secondaires*. Québec : Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur.
- Gouvernement du Québec (2018). *Graphomotricité – Le plaisir d'écrire : ça se prépare! Des pistes de réflexion et d'action pour le milieu scolaire*. Québec : Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur.
- Grabowski, J. (2010). Speaking, writing, and memory span in children: output modality affects cognitive performance. *International Journal of Psychology*, 4(1), 28-39. doi:10.1080/00207590902914051
- Graham, S., Berninger, V., Abbott, R.D., Abbott, S.P. et Whitaker, D. (1997). Role of mechanics in composing of Elementary school students: a new methodological approach. *Journal of Educational Psychology*, 89(1), 170-182. doi:10.1037/0022-0663.89.1.170

- Graham, S., Berninger, V., Weintraub, N. et Schafer, W. (1998). Development of handwriting speed and legibility in Grades 1-9. *The Journal of Educational Research*, 92(1), 42-52. doi:10.1080/00220679809597574
- Graham, S., Gillepsie, A. et McKeown, D. (2013). Writing: importance, development, and instruction. *Reading and Writing*, 26(1), 1-15. doi:10.1007/s11145-012-9395-2
- Graham, S., Harris, K.R. et Adkins, M. (2018). The impact of supplemental handwriting and spelling instruction with first grade students who do not acquire transcription skills as rapidly as peers: a randomized control trial. *Reading & Writing*, 31, 1273-1294. doi:10.1007/s11145-018-9822-0
- Graham, S., Harris, K.R. et Fink, B. (2000). Is handwriting causally related to learning to write? Treatment of handwriting problems in beginning writers. *Journal of Educational Psychology*, 92(4), 620-633. doi:10.1037//0022-0663.92.4.620
- Graham, S., Harris, K.R., Mason, L., Fink-Chorzempa, B., Moran, S. et Saddler, B. (2008). How do primary grade teachers teach handwriting? A national survey. *Reading and Writing*, 21(1), 49-69. doi:10.1007/s11145-007-9064-z
- Graham, S., Struck, M., Santoro, J. et Berninger, V. (2006). Dimensions of good and poor handwriting legibility in first and second Graders: motor programs, visual-spatial arrangement, and letter formation parameter setting. *Developmental neuropsychology*, 29(1), 43-60. doi:10.1207/s15326942dn2901_4
- Graham, S., Weintraub, N. et Berninger, V.W. (1998). The relationship between handwriting style and speed and legibility. *Journal of Educational Research*, 91(5), 290-296. doi:10.1080/00220679809597556
- Graham, S., Weintraub, N. et Berninger, V. (2001). Which manuscript letters do primary grade children write legibly? *Journal of Educational Psychology*, 93(3), 488-497. doi:10.1037/0022-0663.93.3.488
- Guilbert, J., Alamargot, D. et Morin, M.-F. (2018a). Handwriting on a tablet screen: role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human Movement Science*. doi:10.1016/j.humov.2018.09.001.
- Guilbert, J., Jouen, F. et Molina, M. (2018b). Motor imagery development and proprioceptive integration: which sensory reweighting during childhood? *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 621-634. doi:10.1016/j.jecp.2017.09.023
- Guilbert, J., Molina, M. et Jouen, F. (2016). Rôle des afférences proprioceptives dans le développement de l'imagerie motrice chez l'enfant. *Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 70(4), 343-350. doi:10.1037/cep0000099

- Halsband, U. et Lange, R.K. (2006). Motor learning in man: a review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology*, 99, 414-424. doi:10.1016/j.jphysparis.2006.03.007
- Hamstra-Bletz, L. et Blöte, A.W. (1990). Development of handwriting in primary school: a longitudinal study. *Perceptual and Motor skills*, 70, 759-770. doi:10.2466/PMS.70.3.759-770
- Hamstra-Bletz, L. et Blöte, A.W. (1993). A longitudinal study on dysgraphic handwriting in primary school. *Journal of Learning Disabilities*, 26(10), 689-699. doi:10.1177/002221949302601007
- Hanley, J.R. et Peters, S. (1996). A dissociation between the ability to print and write cursively in lower-case letters. *Cortex*, 32, 737-745. doi:10.1016/S0010-9452(96)80043-8
- Hess, S., Mousikou, P., Verrel, J. et Schroeder, S. (2018). Syllabic processing in handwritten word production in German children and adults. *Human Movement Science*. doi: 10.1016/j.humov.2018.07.003.
- Hooper, S.R., Costa, L., McBee, M., Anderson, K.L., Yerby, D.C., Knuth, S.B. et Childress, A. (2011). Concurrent and longitudinal neuropsychological contributors to written language expression in first and second grade students. *Reading and Writing*, 24, 221-252. doi:10.1007/s11145-010-9263-x
- Hoy, M.M.P., Egan, M.Y. et Feder, K.P. (2011). A systematic review of interventions to improve handwriting. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 78(1), 13-25. doi:10.2182/cjot.2011.78.1.3
- Huau, A., Velay, J.-L. et Jover, M. (2015). Graphomotor skills in children with developmental coordination disorder (DCD): handwriting and learning a new letter. *Human Movement Science*, 42, 318-332. doi:10.1016/j.humov.2015.03.008
- Huestegge, L., Radach, R., Corbic, D. et Huestegge, S.M. (2009). Oculomotor and linguistic determinants of reading development: A longitudinal study. *Vision Research*, 49, 2948-2959. doi:10.1016/j.visres.2009.09.012
- Hulstijn, W. et Van Galen, G.P. (1983). Programming in handwriting: reaction time and movement time as a function of sequence length. *Acta Psychologica*, 54, 23-49. doi: 10.1016/0001-6918(83)90021-5
- Humblot, L., Fayol, M. et Lonchamp, K. (1994). La copie de mots en CP et CE1. *Repères*, 9, 47-60. doi:10.3406/reper.1994.2110
- Hupet, M., Schelstraete, M.-A., Demaeght, N. et Fayol, M. (1996). Les erreurs d'accord sujet-verbe en production écrite. *L'année psychologique*, 96(4), 587-610. doi:10.3406/psy.1996.28921

- Hurschler Lichtsteiner, S., Wicki, W. et Falmann, P. (2018). Impact of handwriting training on fluency, spelling and text quality among third graders. *Reading & Writing*, 31, 1295-1318. doi:10.1007/s11145-018-9825-x
- Hyönä, J. et Olson, R.K. (1995). Eye fixation patterns among dyslexic and normal readers: Effects of word length and word frequency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(6), 1430-1440. doi:10.1037/0278-7393.21.6.1430
- James, K.H. (2010). Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Developmental Science*, 13(2), 279-288. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00883.x
- James, K.H. (2017). The importance of handwriting experience on the development of the literate brain. *Current Directions in Psychological Science*, 1-7. doi:10.1177/0963721417709821
- James, K.H. et Atwood, T.P. (2009). The role on sensorimotor learning in the perception of letter-like forms: tracking the causes of neural specialization for letters. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 91-110. doi:10.1080/02643290802425914
- James, K.H. et Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1, 32-42. doi:10.1016/j.tine.2012.08.001
- James, K. H. et Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network. *Neuropsychologia*, 44, 2937-2949. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.06.026
- Jolly, C. et Gentaz, E. (2013). Évaluation des effets d'entraînements avec tablette tactile destinés à favoriser l'écriture de lettres cursives chez des enfants de cours préparatoire. *Sticef*, 20, 1-20. doi:10.3406/stice.2013.1080
- Jones, D. et Christensen, C.A. (1999). Relationship between automaticity in handwriting and student's ability to generate written text. *Journal of Educational Psychology*, 91(1), 44-49. doi:10.1037//0022-0663.91.1.44
- Joseph, H.S.S.L., Liversedge, S.P., Blythe, H.I., White, S.J. et Rayner, K. (2009). Word length and landing position effects during reading in children and adults. *Vision Research*, 49, 2078-2086. doi:10.1016/j.visres.2009.05.015
- Jover, M., Ducrot, S., Huau, A., Bellocchi, A., Brun-Henin, F. et Mancini, J. (2013). Les troubles moteurs chez les enfants dyslexiques : revue de travaux et perspectives. *Enfance*, 4, 323-347. doi:10.4074/S0013754513004023
- Just, M.A. et Carpenter, P.A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in Working Memory. *Psychological Review*, 99(1), 122-149. doi:10.1037//0033-295X.99.1.122

- Kaiser, M.-L., Albaret, J.-M. et Doudin, P.-A. (2011). Efficacy of an explicit handwriting program. *Perceptual and Motor Skills*, 112(2), 610-618. doi:10.2466/11.25.PMS.112.2.610-618
- Kandel, S., Alvarez, C.J. et Vallée, N. (2006). Syllables as processing units in handwriting production. *Journal of Experimental Psychology: Human, perception and performance*, 32(1), 18-31. doi:10.1037/0096-1523.32.1.18
- Kandel, S., Alvarez, C.J. et Vallée, N. (2008). Morphemes also serve as processing units in handwriting production. In M. Baciú (Ed.), *Neuropsychology and cognition of language behavioural, neuropsychological and neuroimaging studies of spoken and written language* (p. 87-100). Kerala, India: Research Signpost.
- Kandel, S., Lassus-Sangosse, D., Grosjacques, G. et Perret, C. (2017). The impact of developmental dyslexia and dysgraphia on movement production during word writing. *Cognitive Neuropsychology*, 34(3-4), 219-251. doi:10.1080/02643294.2017.1389706
- Kandel, S., Peereman, R. et Ghimenton, A. (2013). Further evidence for the interaction of central and peripheral processes: the impact of double letters in writing English words. *Frontiers in Psychology*, 4, 1-8. doi:10.3389/fpsyg.2013.00729
- Kandel, S., Peereman, R. et Ghimenton, A. (2014). How do we code the letters of a word when we have to write it? Investigating double letter representation in French. *Acta Psychologica*, 148, 56-62. doi:10.1016/j.actpsy.2014.01.002
- Kandel, S., Peereman, R., Ghimenton, A. et Perret, C. (2019). Letter coding affects movement production in word writing: an English-Italian cross-linguistic study. *Reading and Writing*, 32(1), 95-114. doi:10.1007/s11145-017-9756-y
- Kandel, S., Peereman, R., Grosjacques, G. et Fayol, M. (2011). For a psycholinguistic model of handwriting production: Testing the syllable-bigram controversy. *Journal of Experimental Psychology: Human, perception and performance*, 37(4), 1310-1322. doi:10.1037/a0023094
- Kandel, S. et Perret, C. (2014). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioural Development*. doi:10.1177/016502541455753.
- Kandel, S. et Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition*, 136, 325-336. doi:10.1016/j.cognition.2014.11.014
- Kandel, S. et Spinelli, E. (2010). Processing complex graphemes in handwriting production. *Memory & Cognition*, 38(6), 762-770. doi:10.3758/MC.38.6.762
- Kandel, S. et Valdois, S. (2005). The effect of orthographic regularity on children's handwriting production. *Current psychology letters*, 17(3), 1-11.

- Kandel, S. et Valdois, S. (2006a). French and Spanish-speaking children use different visual and motor units during spelling acquisition. *Language and Cognitive Processes*, 21(5), 531-561. doi:10.1080/01690960500095946
- Kandel, S. et Valdois, S. (2006b). Syllables as functional units in a copying task. *Language and Cognitive Processes*, 21(4), 432-452. doi:10.1080/01690960400018378
- Karlsdottir, R. et Stefansson, T. (2002). Problems in developing functional handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 94, 623-662. doi:10.2466/pms.2002.94.2.62
- Karsenti, T. et Collin, S. (2013). Avantages et défis inhérents à l'usage des ordinateurs portables au primaire et au secondaire. *Éducation et francophonie*, 41(1), 94-122. doi:10.7202/1015061ar
- Kellogg, R.T. (2008). Training writing skills: a cognitive developmental perspective. *Journal of Writing Research*, 1(1), 1-26. doi:10.17239/jowr-2008.01.01.1
- Kent, S.C. et Wanzek, J. (2016). The relationship between component skills and writing quality and production across developmental levels: a meta-analysis of the last 25 years. *Review of Educational Research*, 86(2), 570-601. doi:10.3102/0034654315619491
- Kent, S.C., Wanzek, J., Petscher, Y., Al Otaiba, S. et Kim, Y.-S. (2014). Writing fluency and quality in kindergarten and first grade: the role of attention, reading, transcription, and oral language. *Reading and Writing*, 27, 1163-1188. doi:10.1007/s11145-013-9480-1
- Kersey, A.J. et James, K.H. (2013). Brain activation patterns resulting from learning letter forms through active self-production and passive observation in young children. *Frontiers in Psychology*, 4(567), 1-15. doi:10.3389/fpsyg.2013.00567
- Kiefer, M., Schuler, S., Mayer, C., Trumpp, N.M., Hille, K. et Sachse, S. (2015). Handwriting or typewriting? The influence of pen- or keyboard-based writing training on reading and writing performance in preschool children. *Advances in Cognitive Psychology*, 11(4), 136-146. doi:10.5709/acp-0178-7
- Kim, Y., Al Otaiba, S., Folsom Sidler, J. et Gruelich, L. (2013). Language, literacy, attentional behaviors, and instructional quality predictors of written composition for first graders. *Early Childhood Research Quarterly*, 28(3), 461-469. doi:10.1016/j.ecresq.2013.01.001
- Kim, Y., Al Otaiba, S., Puranik, C., Folsom Sidler, J., Gruelich, L. et Wagner, R.K. (2011). Componential skills of beginning writing: an exploratory study. *Learning and individual differences*, 21, 517-525. doi:10.1016/j.lindif.2011.06.004

- Kim, J.W., Ritter, F.E. et Koubek, R.J. (2013). An integrated theory for improved skill acquisition and retention in the three stages of learning. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 14(1), 22-37. doi:10.1080/1464536X.2011.573008
- Korkman, M., Kirk, U. et Kemp, S. (2012). *NEPSY. Bilan neuropsychologique de l'enfant*. Paris : ECPA.
- Kremin, H. (1999). La neuropsychologie cognitive de l'orthographe. *Rééducation orthophonique*, 200, 129-146.
- Kyte, C.S. et Johnson, C.J. (2006). The role of phonological recoding in orthographic learning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93, 166-185. doi:10.1016/j.jecp.2005.09.003
- Labrecque, A.-M., Morin, M.-F. et Montésinos-Gelet, I. (2013). Quelle place est accordée à la composante graphomotrice de l'écriture dans les classes au début du primaire? Enquête auprès d'enseignants québécois. *Nouveau cahiers de la recherche en éducation*, 16(1), 104-133. doi:10.7202/1025765ar
- Lambert, E., Alamargot, D. et Fayol, M. (2012). Why use a copy task to study spelling in handwriting? In M. Fayol, D. Alamargot et V. Berninger (Eds.), *Translation of thought to written text while composing: Advancing theory, knowledge, research methods, tools, and applications* (p. 339-356). NY: Psychology Press.
- Lambert, E., Alamargot, D., Larocque, D. et Caporossi, F. (2011). Dynamics of the spelling process during a copy task: effects of regularity and frequency. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 65(3), 141-150. doi:10.1037/a0022538
- Lambert, E. et Espéret, E. (2002). Assemblage des unités traitées par les processus graphomoteurs et orthographiques au début de l'apprentissage de l'écriture. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 7, 76-97.
- Lambert, E., Kandel, S., Fayol, M. et Espéret, E. (2008). The effect of the number of syllables on handwriting production. *Reading and Writing*, 21, 859-883. doi:10.1007/s11145-007-9095-5
- Lambert, E. et Quémart, P. (2019). Introduction to the special issue on the dynamics of written word production: methods, models and processing units. *Reading and Writing*, 32, 1-12. doi:10.1007/s11145-018-9929-3
- Lambert, E., Sausset, S. et Rigalleau, F. (2015). The ortho-syllable as a processing unit in handwriting: the mute e effect. *Reading and Writing*. doi:10.1007/s11145-015-9545-4.
- Landis, J. et Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. doi:10.2307/2529310

- Largy, P., Cousin, M.-P. et Dédéyan, A. (2005). Produire et réviser la morphologie flexionnelle du nombre : de l'accès à une expertise. *Psychologie française*, 50, 339-350. doi:10.1016/j.psfr.2005.05.007
- Lavoie, N. et Boudreau, M. (2014). Le crayon et le clavier pour écrire au préscolaire et en première année. *Da Investigação às práticas*, 4(II), 47 -61.
- Lavoie, N. et Morin, M.-F. (2016). *Une approche pédagogique pour travailler les compétences graphomotrices en écriture au premier cycle du primaire*. Rapport de recherche adressé au FRQ-SC (2013-ER-164687), Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Lavoie, N., Morin, M.-F., Coallier, M. et Alamargot, D. (2019). An explicit multicomponent alphabet writing instruction program in grade 1 to improve writing skills. *European Journal of Psychology of Education*. doi:10.1007/s10212-019-00428-6
- Lavoie, N., Morin, M.-F., et Labrecque, A.-M. (2015). Le geste graphique chez le scripteur au début de l'école primaire : profil des pratiques pédagogiques et des performances des élèves. *Repères*, 52, 177-197. doi:10.4000/reperes.974
- Leblanc, I. (2010). *Les critères d'enseignement de la calligraphie prescrits dans les programmes d'études officiels au Canada*. Essai non publié, Maîtrise en adaptation scolaire et sociale, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Lebon, F., Gueugneau, N. et Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences – Science & Motricité*, 82, 51-61. doi:10.1051/sm/20103092
- Lederer, R. (1987). *Anguished English*. New York: Laurel.
- Lefavrais, P. (1986). *La pipe et le rat ou l'évaluation du savoir-lire du Cours préparatoire à l'Enseignement supérieur*. Paris : Éditions EAP.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal : Guérin.
- Lépine, R., Roussel, J.-P. et Fayol, M. (2003). Résolution procédurale ou récupération en mémoire des additions et multiplications élémentaires chez les enfants. *L'année psychologique*, 103(1), 51-80. doi:10.3406/psy.2003.29623
- Lété, B., Peereman, R. et Fayol, M. (2008). Consistency and word-frequency effects on spelling among first- to fifth-grade French children: a regression-based study. *Journal of Memory and Language*, 58, 952-977. doi:10.1016/j.jml.2008.01.001
- Levin, I., Both-de Vries, A., Aram, D. et Bus, A. (2005). Writing starts with own name writing: from scribbling to conventional spelling in Israeli and Dutch children. *Applied Psycholinguistics*, 26, 463-477. doi:10.1017/S0142716405050253

- Li, J.X. et James, K.H. (2016). Handwriting generates variable visual output to facilitate symbol learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(3), 298-313. doi:10.1037/xge0000134
- Limpo, T., Alves, R.A. et Connelly, V. (2017). Examining the transcription-writing link: effects of handwriting fluency and spelling accuracy on writing performance via planning and translating in middle grades. *Learning and Individual Differences*, 53, 26-36. doi:10.1016/j.lindif.2016.11.004
- Logan, G.D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95(4), 492-527. doi:10.1037/0033-295X.95.4.492
- Longcamp, M., Anton, J.-L., Roth, M. et Velay, J.-L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, 19, 1492-1500. doi:10.1016/S1053-8119(03)00088-0
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J., Anton, J., Roth, M., Nazarian, B. et Velay, J. (2008). Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: Behavioral and functional imaging evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(5), 802-815. doi:10.1162/jocn.2008.20504
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C. et Velay, J.-L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science*, 25, 646-656. doi:10.1016/j.humov.2006.07.007
- Longcamp, M., Lagarrigue, A. et Velay, J.-L. (2010). Contribution de la motricité graphique à la reconnaissance visuelle des lettres. *Psychologie française*, 55(2), 181-194. doi:10.1016/j.psfr.2010.03.001
- Longcamp, M., Velay, J.-L., Berninger, V.W. et Richards, T. (2016). Neuroanatomy of handwriting and related reading and writing skills in adults and children with and without learning disabilities: French-American connections. *Pratiques*, 171-172, 1-11. doi:10.4000/pratiques.3175
- Longcamp, M., Velay, J.-L. et Kandel, S. (2014). L'écriture : gestes, lettres, mots, et cerveau. *La lettre des neurosciences*, 46, 13-15.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T. et Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 67-79. doi:10.1016/j.actpsy.2004.10.019
- Louis-Dam, A., Orliaguet, J.-P. et Kandel, S. (2000). Perception visuelle des mouvements humains : anticipation motrice et anticipation perceptive. *Psychologie française*, 45(4), 333-342.

- Maggio, S., Lété, B., Chenu, F., Jisa, H. et Fayol, M. (2012). Tracking the mind during writing: immediacy, delayed, and anticipatory effects on pauses and writing rate. *Reading and Writing*, 25, 2131-2151. doi: 10.1007/s11145-011-9348-1
- Mangen, A. (2018). Modes of writing in a digital age: The good, the bad and the unknown. *First Monday*, 23(10). doi:10.5210/fm.v23i10.9419
- Mangen, A. et Velay, J.-L. (2010). Digitizing literacy: reflections on the haptics of writing. In M.H. Zadeh (Ed.), *Advances in haptics* (p. 385-401). InTech. doi:10.5772/8710
- Marcelli, A., Parziale, A. et Senatore, R. (2013). Some observations on handwriting from a motor learning perspective. *Online proceedings*, 10, 1-5.
- Martinet, C., Bosse, M.-L., Valdois, S. et Tainturier, M.-J. (1999). Existe-t-il des stades successifs dans l'acquisition de l'orthographe d'usage? *Langue Française*, 124, 58-73. doi:10.3406/lfr.1999.6306
- Martinet, C., Valdois, S. et Fayol, M. (2004). Lexical orthographic knowledge develops from the beginning of literacy acquisition. *Cognition*, 91, B11-B22. doi:10.1016/j.cognition.2003.09.002
- Masaki, H. et Sommer, W. (2012). Cognitive neuroscience of motor learning and motor control. *Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 1(3), 369-380. doi:10.7600/jpfsm.1.369
- McCarney, D., Peters, L., Jackson, S., Thomas, M. et Kirby, A. (2013). Does poor handwriting conceal literacy potential in primary school children? *International Journal of Disability, Development and Education*, 60(2), 105-118. doi:10.1080/1034912X.2013.786561
- McCutchen, D. (1996). A capacity theory of writing: Working Memory in composition. *Educational Psychology Review*, 8(3), 299-325.
- McCutchen, D. (1998). Une théorie de la capacité pour la rédaction: la mémoire de travail dans la composition. In A. Piolat et A. Pélissier (Eds.), *La rédaction de texte: approche cognitive* (p. 183-224). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- McMaster, E. et Roberts, T. (2016). Handwriting in 2015: A main occupation for primary school-aged children in the classroom? *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early intervention*, 9(1), 38-50. doi:10.1080/19411243.2016.1141084
- McNeill, B., Wasterveld, M., van Bysterveldt, A., Boyd, L. et Gillon, G. (2013). Early name writing and invented-spelling development. *New Zealand Journal of Educational Studies*, 48(1), 50-65.
- Medwell, J., Strand, S. et Wray, D. (2007). The role of handwriting in composing for Y2 children. *Journal of Reading, Writing, and Literacy*, 2, 11-21.

- Medwell, J., Strand, S. et Wray, D. (2009). The links between handwriting and composing for Y6 children. *Cambridge Journal of Education*, 39, 329-344. doi:10.1080/03057640903103728
- Medwell, J. et Wray, D. (2007). Handwriting: What do we know and what do we need to know? *Literacy*, 41(1), 10-15. doi:10.1111/j.1467-9345.2007.00453.x
- Medwell, J. et Wray, D. (2008). Handwriting – A forgotten language skill? *Language and Education*, 22(1), 34-47. doi:10.2167/le722.0
- Medwell, J. et Wray, D. (2014). Handwriting automaticity: the search for performance thresholds. *Language and Education*, 28(1), 34-51. doi:10.1080/09500782.2013.763819
- Meulenbroek, R.G.J. et Van Galen, G.P. (1986). Movement analysis of repetitive writing behaviour of first, second and third grade primary school children. In H.S.R Kao, G.P. Van Galen. Et R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: contemporary research in handwriting* (p. 71-92). North Holland: Elsevier Science Publishers. doi:10.1016/S0166-4115(09)60073-X
- Meulenbroek, R.G.J. et Van Galen, G.P. (1988). The acquisition of skilled handwriting: discontinuous trends in kinematic variables. In A.M. Colley et R. Beech (Eds.), *Cognition and Action in Skilled Behaviour* (p. 273-281). Amsterdam: North-Holland. doi:10.1016/S0166-4115(08)60627-5
- Ministère de l'éducation nationale (2015). *Programmes pour les cycles 2, 3 et 4*. France : Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche.
- Ministère de l'éducation nationale (2017). *L'apprentissage de l'écriture au cycle 2*. France : Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche.
- Mojet, J.W. (1991). Characteristics of the developing handwriting skill in elementary education. In J. Wann, A. Wing et N. Sovik (Eds.), *Development of graphic skills: research perspectives and educational implications* (p. 53-75). London: Academic Press.
- Morin, M.-F. (2004). Les niveaux d'explicitation des connaissances sur la morphographie du nombre en 1^{re} année du primaire. *Lidil*, 30, 55-72. doi:10.4000/lidil.1153
- Morin, M.-F., Alamargot, D., Diallo, T.M.O et Fayol, M. (2018). Individual differences in lexical and grammar spelling across primary school. *Learning and Individual Differences*, 62, 128-140. doi:10.1016/j.lindif.2018.02.002
- Morin, M.-F., Bara, F. et Alamargot, D. (2017). Apprentissage de la graphomotricité à l'école : Quelles acquisitions? Quelles pratiques? Quels outils? *Scientia Paedagogica Experimentalis*, 54(1-2), 47-84.

- Morin, M.-F., Lavoie, N. et Montésinos-Gelet, I. (2012). Graphomotor skills, spelling and writing in Grade 2: The effects of teaching practices. *Language and Literacy*, 14(1), 110-124.
- Naka, M. (1998). Repeated writing facilitates children's memory for pseudocharacters and foreign letters. *Memory & Cognition*, 26(4), 804-809. doi:10.3758/BF03211399
- Nation, K., Angell, P. et Castles, A. (2007). Orthographic learning via self-teaching in children learning to read English: Effects of exposure, durability, and context. *Journal of Experimental Child Psychology*, 96, 71-84. doi:10.1016/j.jecp.2006.06.004
- Nootens, P., Doyen, A.-L., Noyer-Martin, M. et Simard-Dupuis, É. (sous presse). Habiletés soutenant l'apprentissage de l'orthographe et apports des dispositifs d'enseignement explicite pour la réussite en orthographe lexicale chez l'élève de l'élémentaire. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE).
- Nunes, T., Bryant, P. et Bindman, M. (1997). Morphological spelling strategies: Developmental stages and processes. *Developmental Psychology*, 33, 637-649. doi:10.1037//0012-1649.33.4.637
- Olinghouse, N.G. (2008). Student- and instruction-level predictors of narrative writing in third-grade students. *Reading and Writing*, 21, 3-26. doi:10.1007/s11145-007-9062-1
- Olive, T. (2014). Toward a parallel and cascading model of the writing system: a review of research on writing processes coordination. *Journal of Writing Research*, 6(2), 173-194. doi:10.17239/jowr-2014.06.02.4
- Olive, T., Alves, R. A. et Castro, S. L. (2007). La production de textes : Quels processus sont activés lors des pauses de production et des phases d'écriture ? In J.-M. Hoc et Y. Corson (Eds.), *Proceedings of the 2007 Congress of the Société Française de Psychologie* (pp. 65-72).
- Olive, T., Alves, R.A. et Castro, S.L. (2009). Cognitive processes in writing during pause and execution periods. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(5), 758-785. doi:10.1080/09541440802079850
- Olive, T. et Kellogg, R.T. (2002). Concurrent activation of high- and low-level production processes in written composition. *Memory & Cognition*, 30(4), 594-600. doi:10.3758/BF03194960
- Olson, R.K., Hulslander, J., Christopher, M., Keenan, J.M., Wadsworth, S.J., Willcutt, E.G., Pennington, B.F. et DeFries, J.C. (2013). Genetic and environmental influences on writing and their relations to language and reading. *Annals of Dyslexia*, 63(1), 25-43. doi:10.1007/s11881-011-0055-z

- Organisation de coopération et de développement économiques (2013). *Évaluation des compétences des adultes. Premiers résultats. Note par pays : France*. Paris : Éditions OCDE.
- Organisation de coopération et de développement économiques (2015). *Connectés pour apprendre? Les élèves et les nouvelles technologies. Principaux résultats*. Paris : Éditions OCDE.
- Orliaguet, J.-P., Kandel, S. et Boe, L.-J. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905-912. doi:10.1068/p260905
- Overvelde, A. et Hulstijn, W. (2011). Handwriting development in grade 2 and grade 3 primary school children with normal, at risk, or dysgraphic characteristics. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 540-548. doi:10.1016/j.ridd.2010.12.027
- Pacton, S. et Afonso Jaco, A. (2015). Comment les enfants apprennent-ils l'orthographe des mots? *Revue française de linguistique appliquée*, XX, 51-61.
- Pacton, S., Fayol, M. et Perruchet, P. (2005). Children's implicit learning of graphotactic and morphological regularities. *Child Development*, 76(2), 324-339. doi:10.1111/j.1467-8624.2005.00848_a.x
- Pacton, S., Perruchet, P., Fayol, M. et Cleeremans, A. (2001). Implicit learning out of the lab: The case of orthographic regularities. *Journal of Experimental Psychology*, 130(3), 401-426. doi:10.1037/0096-3445.130.3.401
- Pagliarini, E., Guasti, M. T., Toneatto, C., Granocchio, E., Riva, F., Sarti, D., Molteni, B. et Stucchi, N. (2015). Dyslexic children fail to comply with the rhythmic constraints of handwriting. *Human Movement Science*, 42, 161-182. doi:10.1016/j.humov.2015.04.012
- Pallant, J. (2010). *SPSS – Survival manual* (4th edition). New York: McGraw-Hill Education.
- Palmis, S., Danna, J., Velay, J.-L. et Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34(3-4), 187-204. doi:10.1080/02643294.2017.1367654
- Palmis, S., Velay, J.-L., Fabiani, E., Nazarian, B., Anton, J.-L., Habib, M., ... Longcamp, M. (2019). The impact of spelling regularity on handwriting production: A coupled fMRI and kinematics study. *Cortex*, 113, 111-127. doi:10.1016/j.cortex.2018.11.024
- Patchan, M.M et Puranik, C.S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137. doi:10.1016/j.compedu.2016.07.007
- Patterson, K. et Wing, A.M. (1989). Processes in handwriting: A case for case. *Cognitive Neuropsychology*, 6(1), 1-23. doi:10.1080/02643298908253282

- Paz-Villagran, V., Danna, J. et Velay, J.-L. (2014). Lifts and stops in proficient and dysgraphic handwriting. *Human Movement Science*, 33, 381-394. doi:10.1016/j.humov.2013.11.005
- Peake, C., Diaz, A. et Artiles, A.D. (2017). Alphabet writing and allograph selection as predictors of spelling in sentences written by Spanish-speaking children who are poor or good keyboarders. *Journal of Learning Disabilities*, 50(5), 543-551. doi:10.1177/0022219416642188
- Peereman, R., Lété, B. et Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra: Distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, and infralexical and lexical units in child-directed written material. *Behaviour Research Methods*, 39(3), 593-603. doi:10.3758/BF03193029
- Pérez, M. (2013). *L'apprentissage de l'orthographe lors de la dictée et la copie de mots manuscrits : effets des tâches et processus sous-jacents*. Thèse de doctorat en sciences du langage, Université Toulouse le Mirail, Toulouse.
- Pérez, M. et Giraudo, H. (2016). *Effets d'encodages visuel (lecture) et visuo-graphomoteur (copie) sur les productions en dictée de pseudomots en 1re et 2e années élémentaires*. In M.-F. Morin, D. Alamargot et C. Gonçalves (Eds.), *Perspectives actuelles sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture/ Contributions about learning to read and write* (p. 338-363). Sherbrooke : Éditions de l'Université de Sherbrooke. doi:10.17118/11143/10275
- Pérez, M., Giraudo, H. et Tricot, A. (2012). Les processus cognitifs impliqués dans l'acquisition de l'orthographe : dictée vs copie. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (ANAE), 118, 280-286.
- Perfetti, C.A. (1997). Psycholinguistique de l'orthographe et de la lecture. In L. Rieben, M. Fayol et C.A. Perfetti (Eds.), *Des orthographes et leur acquisition* (p. 37-56). Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Piolat, A. (2004). Approche cognitive de l'activité rédactionnelle et de son acquisition. Le rôle de la mémoire de travail. *Linx* [En ligne], 51, mis en ligne le 30 juin 2011, consulté le 28 mars 2014. URL : <http://linx.revues.org/174>. doi:10.4000/linx.174
- Piolat, A. et Olive, T. (2000). Comment étudier le coût et le déroulement de la rédaction de textes? La méthode de la triple tâche : un bilan méthodologique. *L'année psychologique*, 100(3), 465-502. doi:10.3406/psy.2000.28655
- Planton, S. (2014). *Processus centraux et périphériques en production écrite de mots : études comportementales, en neuroimagerie fonctionnelle et par stimulation magnétique transcrânienne*. Thèse de doctorat en neuropsychologie, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse.

- Planton, S., Jucla, M., Démonet, J.-F. et Soum-Favaro, C. (2017). Effects of orthographic consistency and word length on the dynamics of written production in adults: psycholinguistic and rTMS experiments. *Reading and Writing*. doi:10.1007/s11145-017-9776-7
- Planton, S., Jucla, M., Roux, F.E. et Demonet, J.F. (2013). The handwriting brain: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, 49(10), 2772-2787. doi:10.1016/j.cortex.2013.05.011
- Planton, S. et Kandel, S. (2016). Substrats cérébraux de la production du langage écrit. In S. Pinto et M. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique. Du cerveau au langage* (p. 183-196). Paris : De Boeck Supérieur.
- Plisson, A., Berthiaume, R. et Daigle, D. (2010). Compétence orthographique chez l'élève dyslexique et chez l'élève sourd : étude comparative. *Canadian Journal of Applied Linguistic/Revue canadienne de linguistique appliquée*, 13, 165-187.
- Pontart, V., Bidet-Ildei, C., Lambert, E., Morisset, P., Flouret, L. et Alamargot, D. (2013). Influence of handwriting skills during spelling in primary and lower secondary grades. *Frontiers in psychology*, 4, 1-9. doi:10.3389/fpsyg.2013.00818
- Portier, S.J., Van Galen, G.P. et Meulenbroek, R.G.J. (1990). Practice and the dynamics of handwriting performance: evidence for a shift of motor programming load. *Journal of Motor Behavior*, 22(4), 474-492. doi:10.1080/00222895.1990.10735524
- Preminger, F., Weiss, P. L. et Weintraub, N. (2004). Predicting occupational performance: Handwriting versus keyboarding. *American Journal of Occupational Therapy*, 58, 193-201. doi:10.5014/ajot.58.2.193
- Prunty, M.M., Barnett, A.L., Wilmut, K. et Plumb, M.S. (2013). Handwriting speed in children with developmental coordination disorder: are they really slower? *Research in Developmental Disabilities*, 34, 2927-2936. doi:10.1016/j.ridd.2013.06.005
- Prunty, M.M., Barnett, A.L., Wilmut, K. et Plumb, M.S. (2014). An examination of writing pauses in the handwriting of children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 35, 2894-2905. doi:10.1016/j.ridd.2014.07.033
- Puranik, C.S. et Al Otaiba, S. (2012). Examining the contribution of handwriting and spelling to written expression in kindergarten children. *Reading and Writing*, 25, 1523-1546. doi:10.1007/s11145-011-9331-x
- Puranik, C.S. et Apel, K. (2010). Effect of assessment task and letter writing ability on preschool children's spelling performance. *Assessment for Effective Intervention*, 36(1), 46-56. doi:10.1177/1534508410380040

- Puranik, C.S. et Lonigan, C. (2012). Name-writing proficiency, not length of name, is associated with preschool children's emergent literacy skills. *Early Childhood Research Quarterly*, 27(2), 284-294. doi:10.1016/j.ecresq.2011.09.003
- Puranik, C.S. et Lonigan, C. (2014). Emergent writing in preschoolers: preliminary evidence for a theoretical framework. *Reading Research Quarterly*, 49(4), 453-467. doi:10.1002/rrq.79
- Purcell, J.J., Turkeltaub, P.E., Eden, G.F. et Rapp, B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in psychology*, 2(239). doi:10.3389/fpsyg.2011.00239
- Rapp, B., Epstein, C. et Tainturier, M.-J. (2002). The integration of information across lexical and sublexical processes in spelling. *Cognitive Neuropsychology*, 19(1), 1-29. doi:10.1080/0264329014300060
- Rapp, B. et Dufor, O. (2011). The neurotopography of written word production: an fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 4067-4081. doi:10.1162/jocn_a_00109
- Rau, A.K., Moeller, K. et Landerl, K. (2014). The transition from sublexical to lexical processing in consistent orthography: an eye-tracking study. *Scientific Studies of Reading*, 18(3), 224-233. doi:10.1080/10888438.2013.857673
- Rau, A.K., Moll, K., Snowling, M.J. et Landerl, K. (2015). Effects of orthographic consistency on eye movement behavior: German and English children and adults process the same words differently. *Journal of Experimental Child Psychology*, 130, 92-105. doi:10.1016/j.jecp.2014.09.012
- Raven, J. (1998). PM38. *Matrices progressives*. Paris : ECPA.
- Roch, D. et François, C. (1999). Synthèse des modèles théoriques et réflexions sur la rééducation de l'orthographe. *Rééducation orthophonique*, 200, 223-240.
- Rodriguez, C. et Villarroel, R. (2016). Predicting handwriting difficulties through spelling processes. *Journal of Learning Disabilities*, 50(5), 504-510. doi:10.1177/0022219416633863
- Ronneberg, V. et Torrance, M. (2019). Cognitive predictors of shallow-orthography spelling speed and accuracy in 6th grade children. *Reading and Writing*, 32, 197-216. doi:10.1007/s11145-017-9751-3
- Rosenblum, S. (2005). Using the alphabet task to differentiate between proficient and nonproficient handwriters. *Perceptual and Motor Skills*, 100, 629-639. doi:10.2466/pms.100.3.629-639

- Rosenblum, S., Chevion, D. et Weiss, P.L. (2006). Using data visualization and signal processing to characterize the handwriting process. *Pediatric Rehabilitation*, 9(4), 404-417. doi:10.1080/13638490600997964
- Rosenblum, S., Weiss, P.L. et Parush, S. (2003). Product and process evaluation of handwriting difficulties. *Educational Psychology Review*, 15(1), 41-81. doi:10.1023/A:1021371425220
- Rosenblum, S., Weiss, P.L. et Parush, S. (2004). Handwriting evaluation for developmental dysgraphia: process versus product. *Reading & Writing: An Interdisciplinary Journal*, 17, 433-458. doi:10.1023/B:READ.0000044596.91833.55
- Rouleau, N. (2016). *Les habiletés graphomotrices et les habiletés de production écrite chez les élèves de deuxième année du primaire*. Essai non publié, Maîtrise en sciences de l'éducation, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Roux, S., McKeef, T.J., Grosjacques, G., Afonso, O. et Kandel, S. (2013). The interaction between central and peripheral processes in handwriting production. *Cognition*, 127, 235-241. doi:10.1016/j.cognition.2012.12.009
- Rueckriegel, S.M., Blankenburg, F., Burghardt, R., Ehrlich, S., Henze, G., Mergl, R. et Driever, P.H. (2008). Influence of age and movement complexity on kinematic hand movement parameters in childhood and adolescence. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 26, 655-663. doi:10.1016/j.ijdevneu.2008.07.015
- Santangelo, T. et Graham, S. (2016). A comprehensive meta-analysis of handwriting instruction. *Educational Psychology Review*, 28(2), 225-265. doi:10.1007/s10648-015-9335-1
- Sausset, S., Lambert, E. et Olive, T. (2013). Flexibility of orthographic and graphomotor coordination during a handwritten copy task: effect of time pressure. *Frontiers in psychology*, 4, 1-9. doi:10.3389/fpsyg.2013.00866
- Sausset, S., Lambert, E. et Olive, T. (2016). La syllabe dans la production écrite de mots. *L'Année psychologique*, 116, 137-169. doi:10.4074/S0003503315000261
- Sausset, S., Lambert, E., Olive, T. et Larocque, D. (2012). Processing of syllables during handwriting: Effects of graphomotor constraints. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(10), 1872-1879. doi:10.1080/17470218.2012.715654
- Schelstraete, M.-A. et Maillart, C. (2004). Développement des mécanismes orthographiques et limitations de traitement. *Glossa*, 89, 4-20.
- Schwellnus, H., Cameron, D. et Carnahan, H. (2012). Which to choose: Manuscript or cursive handwriting? A review of the literature. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention*, 5(3-4), 248-258. doi:10.1080/19411243.2012.744651

- Share, D.L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55, 151-218. doi:10.1016/0010-0277(94)00645-2
- Share, D.L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129. doi:10.1006/jecp.1998.2481
- Share, D.L. (2004). Orthographic learning at a glance: on the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 267-298. doi:10.1016/j.jecp.2004.01.001
- Soppelsa, R. et Albaret, J.-M. (2014). Caractéristiques de la dysgraphie ou du trouble de l'apprentissage de la graphomotricité (TAG) au collège. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (ANAE)*, 128, 1-6.
- Sovik, N. et Arntzen, O. (1986). A comparative study of the writing/spelling performances of normal, dyslexic, and dysgraphic children. *European Journal of Special Needs Education*, 1(2), 85-101. doi:10.1080/0885625860010201
- Sovik, N., Arntzen, O., Samuelstuen, M. et Heggberget, M. (1994). Relations between linguistic wordgroups and writing. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette et A. Vinter (Eds.), *Advances in handwriting and drawing: A multidisciplinary approach* (p. 231-246). Paris: Europia.
- Sovik, N., Samuelstuen, M., Svarva, K. et Lie, A. (1996). The relationship between linguistic characteristics and reading/writing performances of Norwegian children. *Reading and Writing: An interdisciplinary Journal*, 8, 199-216. doi:10.1007/BF00555370
- Sprenger-Charolles, L. (2005). Les procédures d'accès aux mots écrits : développement normal et dysfonctionnements dans la dyslexie développementale. *Rééducation orthophonique*, 222, 69-100.
- Sprenger-Charolles, L., Bechennec, D. et Lacert, P. (1998). Place et rôle de la médiation phonologique dans l'acquisition de la lecture/écriture en français. Résultats d'une étude longitudinale de la Grande Section de Maternelle en fin de CE1. *Revue française de pédagogie*, 122, 51-67. doi:10.3406/rfp.1998.1136
- Sprenger-Charolles, L. et Casalis, S. (1996). *Lecture et écriture : acquisition et troubles du développement*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S., Bechennec, D. et Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84, 194-217. doi:10.1016/S0022-0965(03)00024-9
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L.S. et Bonnet, P. (1998). Reading and spelling acquisition in French: the role of phonological mediation and orthographic factors. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 134-165. doi:10.1006/jecp.1997.2422

- Stanké, B., Le Mené, M., Rezzonico, S., Moreau, A., Dumais, C., Robidoux, J., Dault, C. et Royle, P. (2019). ÉQOL : une nouvelle base de données québécoise du lexique scolaire du primaire comportant une échelle d'acquisition de l'orthographe lexicale. *Corpus* [En ligne], 19. Document téléaccessible à l'adresse <<https://journals.openedition.org/corpus/3818>>.
- Stelmach, G.E. et Teulings, H.L. (1983). Response characteristics of prepared and restructured handwriting. *Acta Psychologica*, 54, 51-67. doi:10.1016/0001-6918(83)90022-7
- Stevenson, N.C. et Just, C. (2014). In early education, why teach handwriting before keyboarding? *Early Childhood Education Journal*, 42(1), 49-56. doi:10.1007/s10643-012-0565-2
- Suarez-Coalla, P., Gonzalez-Martin, N. et Cuetos, F. (2018). Word writing in Spanish-speaking children: central and peripheral processes. *Acta Psychologica*, 191, 201-209. doi:10.1016/j.actpsy.2018.10.001
- Tainturier, M.-J. et Rapp, B. (2001). The spelling process. In B. Rapp (Ed.), *The handbook of cognitive neuropsychology: what deficits reveal about the human mind* (p. 263-289). Philadelphia, PA: Psychology Press.
- Tanimoto, S., Thompson, R., Berninger, V.W., Nagy, W. et Abbott, R.D. (2015). Computerized writing and reading instruction for students in grades 4-9 with specific learning disabilities affecting written language. *Journal of Computer Assisted Learning*, 31, 671-689. doi:10.1111/jcal.12110
- Teulings, H.L., Thomassen, A.J.W.M. et Van Galen, G.P. (1983). Preparation of partly precued handwriting movements: the size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica*, 54, 165-177. doi:10.1016/0001-6918(83)90031-8
- Thibon, L.S., Gerber, S. et Kandel, S. (2018a). The elaboration of motor programs for the automation of letter production. *Acta Psychologica*, 182, 200-211. doi:10.1016/j.actpsy.2017.12.001
- Thibon, L.S., Barbier, G., Vilain, C., Sawallis, T., Gerber, S. et Kandel, S. (2018b). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *Human Movement Science*. doi:10.1016/j.humov.2018.04.008.
- Thomassen, A.J.W.M. et Schomaker, L.R.B. (1986). Between-letter context effects in handwriting trajectories. *Advances in Psychology*, 37, 253-272. doi:10.1016/S0166-4115(09)60086-8
- Tiffin-Richards, S.P. et Schroeder, S. (2015). Word length and frequency effects on children's eye movements during silent reading. *Vision Research*, 113, 33-43. doi:10.1016/j.visres.2015.05.008

- Torrance, M. et Galbraith, D. (2006). The processing demands of writing. In C. A. MacArthur, S. Graham et J. Fitzgerald (Eds.), *Handbook of Writing Research* (p. 67-80). New York: Guilford Press.
- Totereau, C., Barrouillet, P. et Fayol, M. (1998). Overgeneralizations of number inflections in the learning of written French: The case of noun and verb. *British Journal of Developmental Psychology*, 16, 447-464. doi:10.1111/j.2044-835X.1998.tb00764.x
- Treiman, R. (2017). Learning to spell words: Findings, theories, and issues. *Scientific studies of reading*, 21(4), 265-276. doi:10.1080/10888438.2017.1296449
- Van den Bergh, H. et Rijlaarsdam, G. (1999) The dynamics of idea generation during writing. An on-line study. In M. Torrance et D. Galbraith (Eds.), *Knowing what to write: conceptual processes in the generation, selection and development of ideas during text production* (p. 99-120). Amsterdam: Amsterdam University Press. doi:10.1108/S1572-6304(2007)0000020010
- Vander Hart, N., Fitzpatrick, P. et Cortesa, C. (2010). In-depth analysis of handwriting curriculum and instruction in four kindergarten classrooms. *Reading and Writing*, 23, 673–699. doi:10.1007/s11145-009-9178-6
- Van der Plaats, R.E. et Van Galen, G.P. (1990). Effects of spatial and motor demands in handwriting. *Journal of motor behaviour*, 22(3), 361-385. doi:10.1080/00222895.1990.10735519
- Van Doorn, R.R.A. et Keuss, P.J.G. (1992). The role of vision in the temporal and spatial control of handwriting. *Acta Psychologica*, 81, 269-286. doi:10.1016/0001-6918(92)90021-5
- Van Galen, G.P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191. doi:10.1016/0167-9457(91)90003-G
- Van Galen, G.P. et Weber, J.F. (1998). On-line size control in handwriting demonstrates the continuous nature of motor programs. *Acta Psychologica*, 100, 195-216. doi:10.1016/S0001-6918(98)00034-1
- Véronis, J. (1988). From sound to spelling in French: Simulation on a computer. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 8, 315-334.
- Veys, E. et Hupet, M. (2011). The role of visual feedback in supervision of grammatical spelling. *Perceptual and Motor Skills*, 112(3), 680-690. doi:10.2466/11.24.28.PMS.112.3.680-690
- Vinter, A. et Zesiger, P. (2007). L'écriture chez l'enfant : apprentissage, troubles et évaluation. In S. Ionescu et A. Blanchet (Eds.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (p. 327-351). Paris : Presses Universitaires de France.

- Wagner, R.K., Puranik, C.S., Foorman, B., Foster, E., Gehron Wilson, L., Tschinkel, E. et Thatcher Kantor, P. (2011). Modeling the development of written language. *Reading and Writing*, 24, 203-220. doi:10.1007/s11145-010-9266-7
- Wanzek, J., Gatlin, B., Al Otaiba, S. et Kim, Y.-S.G. (2017). The impact of transcription writing interventions for first-grade students. *Reading & Writing Quarterly*, 33(5), 484-499. doi:10.1080/10573569.2016.1250142
- Wechsler, D. (2005). *Wechsler Individual Achievement Test 2nd Edition (WIAT-II)*. London: The Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (2007). *WISC-IV. Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents – Quatrième édition*. Paris : ECPA.
- Weekes, B.S. (1997). Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A(2), 439-456. doi:10.1080/713755710
- Weigelt-Marom, H. et Weintraub, N. (2018). Keyboarding versus handwriting speed of higher education students with and without learning disabilities: Does touch-typing assist in narrowing the gap? *Computers & Education*, 117, 132-140. doi:10.1016/j.compedu.2017.10.008
- Weintraub, N., Drory-Asayag, A., Dekel, R., Jokobovits, H. et Parush, S. (2007). Developmental trends in handwriting performance among middle school children. *OTJR: Occupation, Participation and Health*, 27, 104-113. doi:10.1177/153944920702700304
- Wicki, W. et Hurschler Lichtsteiner, S. (2018). Improvement of handwriting automaticity among children treated for graphomotor difficulties over a period of six months. *Journal of Occupational therapy, Schools, & Early intervention*, 11(2), 148-160. doi:10.1080/19411243.2018.1432440
- Wicki, W., Hurschler Lichtsteiner, S., Geiger, A.S. et Müller, M. (2014). Handwriting fluency in children: Impact and correlates among others. *Swiss Journal of Psychology*, 73(2), 87-96. doi:10.1024/1421-0185/a000127
- Wing, A.M. (1978). Response timing in handwriting. In G.E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (p. 153-172). New York: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-665960-3.50012-8
- Wing, A.M. et Baddeley, A.D. (1980). Spelling errors in handwriting: a corpus and a distributional analysis. In U. Frith (Ed.), *Cognitive Processes in Spelling* (p. 251-285). London: Academic Press.
- Wing, A.M. et Baddeley, A.D. (2009). Righting errors in writing errors: the Wing and Baddeley (1980) spelling error corpus revisited. *Cognitive Neuropsychology*, 26(2), 223-226. doi:10.1080/02643290902823612

- Wolpert, D.M., Diedrichsen, J. et Flanagan, J.R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 12, 739-751. doi:10.1038/nrn3112
- Wolpert, D.M., Ghahramani, Z. et Jordan, M.I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269, 1880-1882. doi:10.1126/science.7569931
- Zemlock, D., Vinci-Booher, S. et James, K.H. (2018). Visual-motor symbol production facilitates letter recognition in young children. *Reading & Writing*, 31(6), 1255-1271. doi:10.1007/s11145-018-9831-z
- Zesiger, P. (1992). *L'écriture chez l'enfant de 8 à 12 ans et chez l'adulte. Aspects perceptivo-moteurs et effets linguistiques*. Thèse de doctorat en psychologie, Université de Genève, Genève.
- Zesiger, P. (1995). *Écrire : approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : Presses universitaires de France.
- Zesiger, P. (2003). Acquisition et troubles de l'écriture. *Enfance*, 55, 56-64.
- Zesiger, P., Deonna, T. et Mayor, C. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53, 295-304.
- Zesiger, P., Mounoud, P. et Hauert, C.-A. (1993). Effects of lexicality and trigram frequency on handwriting production in children and adults. *Acta Psychologica*, 82, 353-365. doi:10.1016/0001-6918(93)90020-R
- Ziviani, J. et Wallen, M. (2006). The development of graphomotor skills. In A. Henderson et C. Pehoski (Eds.), *Hand Function in the Child: Foundations for remediation* (p. 217-236). St-Louis, MI: Mosby Elsevier. doi:10.1016/B978-032303186-8.50014-9
- Zoccolotti, P., De Luca, M., Di Pace, E., Gasperini, F., Judica, A. et Spinelli, D. (2005). Word length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain and Language*, 93, 369-373. doi:10.1016/j.bandl.2004.10.010

ANNEXE A

COEFFICIENTS DE CORRÉLATION RECENSÉS DANS LA LITTÉRATURE ENTRE LA GRAPHOMOTRICITÉ ET L'ORTHOGRAPHE LEXICALE

Étude	Langue	Niveau	N	Graphomotricité		Orthographe		r
				Tâches	Mesures	Tâches	Mesures	
Puranik et Apel (2010)	Anglais	Préscolaire	104	Dictée des 26 lettres de l'alphabet (sans limite de temps)	Conformité	Dictée de 12 mots à partir de tuiles de lettres en plastique	Échelle de réussite (0 à 7)	.60
						Dictée orale de 12 mots		.61
						Dictée écrite de 12 mots		.73
Kent et al. (2014)	Anglais	Maternelle	265	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WJ-III	Réussite (correct/incorrect)	.41
						Dictée écrite de 14 mots et pseudo-mots	Échelle de réussite (0 à 6)	.50
Puranik et AlOtaiba (2012)	Anglais	Maternelle	242	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Dictée écrite de 14 mots et pseudo-mots	Échelle de réussite (0 à 6)	.48
Kim et al. (2011)	Anglais	Maternelle	242	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Dictée écrite de 15 mots	Échelle de réussite (0 à 6)	.49
						Dictée écrite de 4 pseudo-mots	Échelle de réussite (0 à 6)	.41
Medwell et al. (2007)	Anglais	1	186	Test de rendement national	Conformité	Test de rendement national	Réussite (correct/incorrect)	.43
				Copie d'un pangramme (3 min)	Vitesse			.47
				Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité			.56
Kim et al. (2013)	Anglais	1	527	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WJ-III	Réussite (correct/incorrect)	.37
Hooper et al. (2011)	Anglais	1	205	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WIAT-II	Réussite (correct/incorrect)	.40
Wanzek et al. (2017)	Anglais	1	81	Rappel écrit de l'alphabet (30 s)	Fluidité	Sous-test du WJ-III	Réussite (correct/incorrect)	.36
						Dictée écrite de 20 mots	Réussite (correct/incorrect)	.48
Rouleau (2016)	Français	2 (début)	142	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Conformité	Copie différée de 20 mots	Pourcentage de mots bien orthographiés	.09
					Vitesse			.27
					Fluidité			.26
					Conformité	Rédaction d'un court résumé (10 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.03
					Vitesse			.01
					Fluidité			.02

		2 (fin)			Conformité	Copie différée de 20 mots	Pourcentage de mots bien orthographiés	.31
					Vitesse			.06
					Fluidité			.26
					Conformité	Rédaction d'un court résumé (10 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.33
					Vitesse			.10
					Fluidité			.30
Bosga-Stork et al. (2015)	Néerlandais	1	32	Copie d'un texte (5 min)	Vitesse	Dictée écrite de 25 mots ou phrases	Réussite (correct/incorrect)	.36
		2						.39
		3						.17
Berninger et al. (1992)	Anglais	1-2-3	300	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WRAT-R	Réussite (correct/incorrect)	.20
				Copie d'un court paragraphe (90 s)	Vitesse			.26
McCarney et al. (2013)	Anglais	3	284	Copie d'un court paragraphe (sans limite de temps)	Conformité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WIAT-II	Réussite (correct/incorrect)	.34
Olinghouse (2008)	Anglais	3	120	Copie d'un pangramme (60 s)	Conformité	Rédaction d'un texte narratif (15 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.20
Alves et Limpo (2015)	Portugais	2-3-4	124	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Dictée écrite de 56 mots	Réussite (correct/incorrect)	.39
		5-6-7	125					.33
Wagner et al. (2011)	Anglais	1	98	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité	Rédaction d'un texte argumentatif (10 min)	Nombre d'erreurs d'orthographe	-.09
				Copie d'un pangramme (60 s)	Vitesse			.04
		4	88	Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité			-.18
				Copie d'un pangramme (60 s)	Vitesse			-.07
Wicki et al. (2014)	Allemand	4	93	Copie d'un texte (5 min)	Vitesse	Dictée écrite de 42 mots ou phrases	Réussite (correct/incorrect)	.43
					Conformité			.25
				Copie d'une phrase (sans limite de temps)	Nb. de pics de vitesse			.26
					Nb. de traits par seconde			.30
					Pression			-.01
Medwell et al. (2009)	Anglais	5	196	Test de rendement national	Conformité	Test de rendement national	Réussite (correct/incorrect)	.22
				Copie d'un pangramme (3 min)	Vitesse			.41
				Rappel écrit de l'alphabet (60 s)	Fluidité			.46
Graham et al. (1997)	Anglais	1-2-3	300	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WRAT-R	Réussite (correct/incorrect)	.33
						Rédaction d'un texte narratif (5 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.21
						Rédaction d'un texte explicatif (5 min)		.24

				Copie d'un court paragraphe (90 s)	Vitesse	Sous-test <i>Orthographe</i> du WRAT-R	Réussite (correct/incorrect)	.18
						Rédaction d'un texte narratif (5 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.16
						Rédaction d'un texte explicatif (5 min)		.17
		4-5-6	300	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WRAT-R	Réussite (correct/incorrect)	.20
						Rédaction d'un texte narratif (5 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.47
						Rédaction d'un texte explicatif (5 min)		.32
				Copie d'un court paragraphe (90 s)	Vitesse	Sous-test <i>Orthographe</i> du WRAT-R	Réussite (correct/incorrect)	.22
						Rédaction d'un texte narratif (5 min)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.57
						Rédaction d'un texte explicatif (5 min)		.46
Abbott et al. (2010)	Anglais	1	128	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Sous-test <i>Orthographe</i> du WIAT-II	Réussite (correct/incorrect)	.37
		2						.35
		3						.29
		4						.24
		5						.25
		6						.20
		7						.19
Limpo et al. (2017)	Portugais	7-8	196	Rappel écrit de l'alphabet (15 s)	Fluidité	Rédaction d'un texte d'opinion (avec planification)	Pourcentage de mots bien orthographiés	.28
						Rédaction d'un texte d'opinion (sans planification)		.18
				Copie d'un pangramme (90 s)	Vitesse	Rédaction d'un texte d'opinion (avec planification)		.36
						Rédaction d'un texte d'opinion (sans planification)		.25
Pontart et al. (2013)	Français	2-3-4-5	44	Rappel écrit du nom-prénom (sans limite de temps)	Vitesse de mouvement	Dictée écrite de 27 mots	Vitesse de mouvement	.77
					Durée de production par lettre		Pourcentage de mots mal orthographiés	-.34
								Durée de production par lettre

							Pourcentage de mots mal orthographiés	.38
				Rappel écrit de l’alphabet (sans limite de temps)	Vitesse de mouvement		.75	
					Durée de production par lettre		Pourcentage de mots mal orthographiés	-.44
							Durée de production par lettre	.41
		6-7-8-9	40	Rappel écrit du nom-prénom (sans limite de temps)	Vitesse de mouvement		.46	
					Durée de production par lettre		Vitesse de mouvement	.73
							Pourcentage de mots mal orthographiés	.01
							Durée de production par lettre	.26
				Rappel écrit de l’alphabet (sans limite de temps)	Durée de production par lettre		Pourcentage de mots mal orthographiés	.02
							Vitesse de mouvement	.72
							Pourcentage de mots mal orthographiés	-.15
							Durée de production par lettre	-.01
							Pourcentage de mots mal orthographiés	.41

Note. En rouge : corrélation non significative

ANNEXE B

LISTE DES STIMULI DE L'ÉTUDE 1

Liste A											Liste B										
Item	U	CPG	NL	PH	GR	PU	VO	SYLi	SYLf	FBG	Item	U	CPG	NL	PH	GR	PU	VO	SYLi	SYLf	FBG
Fréquents et consistants (F/C)																					
Moteur	70	97	6	5	5	7	0	3197	1241	14630	Montre	78	93	6	5	5	7	391	2552	8917	19432
Diable	141	94	6	6	6	7	0	136	2885	6948	Région	139	88	6	5	5	7	0	3475	137	5751
Marche	128	99	6	5	5	7	161	1111	656	8577	Docteur	135	91	7	6	6	8	0	134	1241	11053
Chaperon	80	88	8	5	6	9	0	2017	83	10215	Troupeau	82	92	8	5	5	9	0	1069	401	11962
Fauteuil	65	82	8	5	5	9	0	1153	62	10330	Chasseur	65	82	8	5	5	9	2	2017	305	12589
Fréquents et inconsistants (F/NC)																					
Sommet	96	57	6	4	5	7	212	1066	1181	9527	Secret	92	70	6	5	6	7	0	11177	125	7740
Cadeau	113	53	6	4	4	7	18	2864	218	3771	Colonne	123	63	7	5	6	8	10	3626	115	13009
Planète	101	70	7	6	7	8	0	519	297	11727	Cahier	106	60	6	4	5	7	2	2864	1784	9077
Mystère	54	51	7	6	6	8	0	124	503	6906	Assiette	56	47	8	5	6	9	0	49060	54	11072
Marchand	93	75	8	5	6	9	27	1111	261	12219	Seconde	95	65	7	5	6	8	0	11177	130	10857
Non-fréquents et consistants (NF/C)																					
Lardon	4.15	98	6	5	5	7	2	248	71	12913	Harpon	6.98	95	6	4	5	7	0	1436	379	7478
Labour	2.47	100	6	5	5	7	1	28278	81	19976	Trèfle	4.78	75	6	6	6	4	0	1708	178	6250
Charmeur	0.54	98	8	6	6	9	0	316	96	12875	Lourdeur	0.77	98	8	6	6	9	0	159	177	16447
Fiston	3.69	82	6	5	5	4	0	229	506	8608	Hachoir	0.01	99	7	5	5	5	0	49060	66	7175
Poivron	2.70	97	7	6	5	8	0	551	25	11396	Goudron	1.27	96	7	5	5	8	0	151	55	13723
Non-fréquents et inconsistants (NF/NC)																					
Chorale	0.78	67	7	5	6	7	0	3626	151	11101	Oursin	2.06	58	6	4	4	7	6	10	549	7337
Pingouin	4.53	68	8	5	5	9	0	497	3	11805	Marelle	4.77	67	7	5	6	8	0	4293	69	14973
Théière	1.81	51	7	5	6	5	0	966	80	6377	Kiosque	1.69	60	7	6	6	8	0	1	1872	5961
Chrétien	1.26	68	8	6	6	9	0	89	228	8434	Rizièrre	2.04	61	7	6	7	5	164	489	23	6612
Tendance	3.39	57	8	5	6	7	0	1976	72	14523	Nourrice	3.11	59	8	5	6	8	0	4093	53	14473

Note. U = fréquence lexicale; CPG = consistance moyenne des associations phonème-graphème; NL = nombre de lettres; PH = nombre de phonèmes; GR = nombre de graphèmes; PU = point d'unicité orthographique; VO = nombre de voisins orthographiques; SYLi = fréquence de la première syllabe; SYLf = fréquence de la deuxième syllabe; FBG = fréquence bigrammique moyenne.

ANNEXE C **CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES DES STIMULI DE L'ÉTUDE 1**

	Fréquents et consistants (F/C)		Fréquents et inconsistants (F/NC)		Non-fréquents et consistants (NF/C)		Non-fréquents et inconsistants (NF/NC)	
	Liste A	Liste B	Liste A	Liste B	Liste A	Liste B	Liste A	Liste B
U	96.73 (35.23)	99.98 (34.72)	91.75 (22.27)	94.33 (24.75)	2.71 (1.40)	2.76 (2.98)	2.35 (1.56)	2.73 (1.26)
CPG	91.87 (6.88)	89.20 (4.36)	61.52 (10.71)	60.95 (8.58)	94.97 (7.50)	92.65 (10.21)	62.37 (7.69)	61.02 (3.66)
NL	6.80 (1.10)	7.00 (1.00)	6.80 (0.84)	6.80 (0.84)	6.60 (0.89)	6.80 (0.84)	7.60 (0.55)	7.00 (0.71)
PH	5.20 (0.45)	5.20 (0.45)	5.00 (1.00)	4.80 (0.45)	5.40 (0.55)	5.20 (0.84)	5.20 (0.45)	5.20 (0.84)
GR	5.40 (0.55)	5.20 (0.45)	5.60 (1.14)	5.80 (0.45)	5.20 (0.45)	5.40 (0.55)	5.80 (0.45)	5.80 (1.10)
PU	7.80 (1.10)	8.00 (1.00)	7.80 (0.84)	7.80 (0.84)	7.00 (1.87)	6.60 (2.07)	7.40 (1.67)	7.20 (1.30)
VO	32.20 (72.00)	78.60 (174.64)	51.40 (90.54)	2.40 (4.34)	0.60 (0.89)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	34.00 (72.72)
SYLi	1522.68 (1148.51)	1849.25 (1295.89)	1136.84 (1048.41)	15580.99 (19132.93)	5924.28 (12496.54)	10502.85 (21566.03)	1430.96 (1414.50)	1777.34 (2215.23)
SYLf	985.34 (1167.27)	2200.34 (3779.09)	492.02 (400.48)	441.63 (751.11)	156.01 (197.33)	170.84 (130.16)	106.94 (85.59)	513.30 (789.89)
FBG	10140.10 (2864.97)	12157.34 (4883.75)	8830.20 (3523.37)	10351.18 (2017.53)	13153.82 (4195.92)	10214.64 (4571.60)	10447.92 (3142.69)	9871.14 (4459.39)

Note. U = fréquence lexicale; CPG = consistance moyenne des associations phonème-graphème; NL = nombre de lettres; PH = nombre de phonèmes; GR = nombre de graphèmes; PU = point d'unicité orthographique; VO = nombre de voisins orthographiques; SYLi = fréquence de la première syllabe; SYLf = fréquence de la deuxième syllabe; FBG = fréquence bigrammique moyenne.

ANNEXE D
CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES DES STIMULI DE L'ÉTUDE 2

	Fréquents et consistants (F/C)	Fréquents et inconsistants (F/NC)	Non-fréquents et consistants (NF/C)	Non-fréquents et inconsistants (NF/NC)
U	98.35 (33.02)	93.04 (22.24)	2.74 (2.20)	2.54 (1.35)
CPG	90.53 (5.61)	61.23 (9.16)	93.81 (8.53)	61.70 (5.72)
NL	6.90 (0.99)	6.80 (0.79)	6.70 (0.82)	7.30 (0.67)
PH	5.20 (0.42)	4.90 (0.74)	5.30 (0.67)	5.20 (0.63)
GR	5.30 (0.48)	5.70 (0.82)	5.30 (0.48)	5.80 (0.79)
PU	7.90 (0.99)	7.80 (0.79)	6.80 (1.87)	7.30 (1.42)
SYLi	1685.97 (1167.15)	8358.92 (14870.76)	8213.56 (16790.99)	1604.15 (1761.70)
SYLf	1592.84 (2713.48)	466.82 (568.09)	163.42 (157.79)	310.12 (571.34)
FBG	11148.72 (3921.58)	9590.69 (2822.95)	11684.23 (4417.36)	10159.53 (3649.69)

Note. U = fréquence lexicale; CPG = consistance moyenne des associations phonème-graphème; NL = nombre de lettres; PH = nombre de phonèmes; GR = nombre de graphèmes; PU = point d'unicité orthographique; SYLi = fréquence de la première syllabe; SYLf = fréquence de la deuxième syllabe; FBG = fréquence bigrammique moyenne.

ANNEXE E





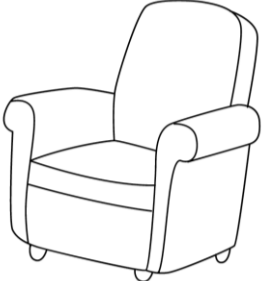
LISTE DES STIMULI DE L'ÉTUDE 3 ET CARACTÉRISTIQUES LINGUISTIQUES



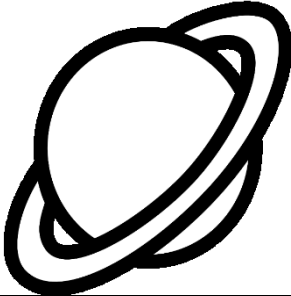


Courts (4 lettres)					Longs (8 lettres)				
Item	U	CPG	FBG	VO	Item	U	CPG	FBG	VO
Abri	50.06	90.6	1007.6	0	Autruche	40.54	83.98	6960.2	2
Acte	12.92	79.5	7309.1	0	Dimanche	109.27	77.02	9770.1	0
Curé	19.39	70.06	5943.5	12	Montagne	176.94	83.25	13356.1	0
Ogre	25.04	90.53	9984.2	3	Problème	114.34	74.22	5363.7	0
Papa	439.26	95.47	8106.3	16	Rubrique	12.51	79.46	6260.7	0
Zéro	28.95	74.53	1067.6	0	Surprise	80.42	84.86	9062.2	0
<i>M</i>	95.94	83.45	5569.72	5.17	<i>M</i>	89.00	80.46	8462.17	0.33
(<i>ÉT</i>)	(168.66)	(10.20)	(3746.17)	(7.06)	(<i>ÉT</i>)	(58.41)	(4.27)	(2923.15)	(0.82)


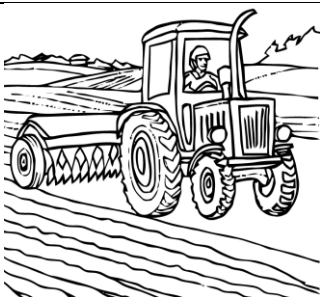


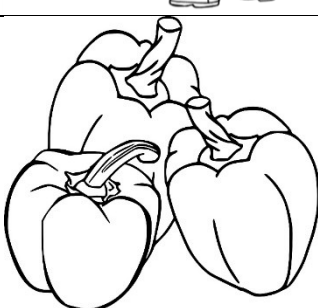
Note. U = fréquence lexicale; CPG = consistance moyenne des associations phonème-graphème; FBG = fréquence bigrammique moyenne; VO = nombre de voisins orthographiques.



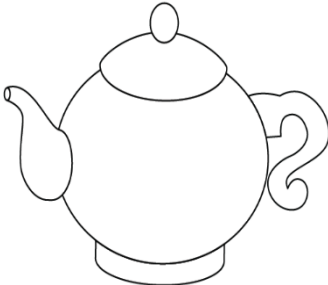
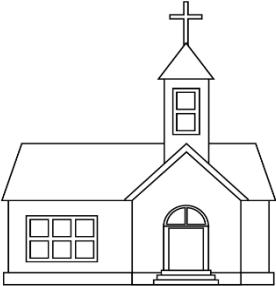

ANNEXE F




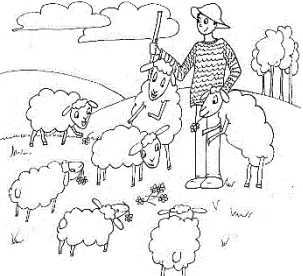

DÉFINITIONS ET IMAGES DES MOTS AUX ÉTUDES 1 ET 2

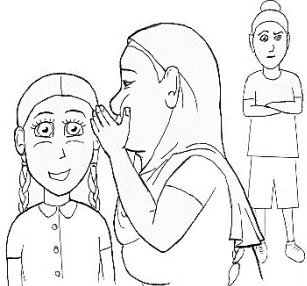
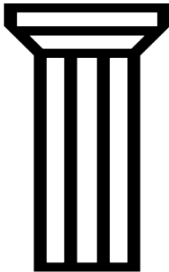
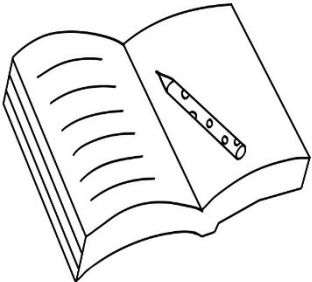
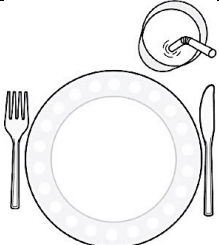

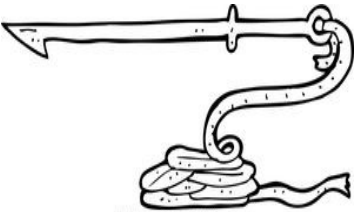
<p>Moteur</p> <p>« Un moteur est un appareil qui permet de produire un mouvement »</p> <p>Par exemple : le moteur d'une voiture</p>	
<p>Diable</p> <p>« Un diable est un démon qui représente l'esprit du mal »</p>	
<p>Marche</p> <p>« Une marche est une activité physique qui permet de se déplacer à pied »</p>	
<p>Chaperon</p> <p>« Un chaperon est une sorte de capuche enveloppant la tête et le cou »</p>	
<p>Fauteuil</p> <p>« Un fauteuil est un siège à dossier comportant des accoudoirs dans lequel on peut s'asseoir »</p>	

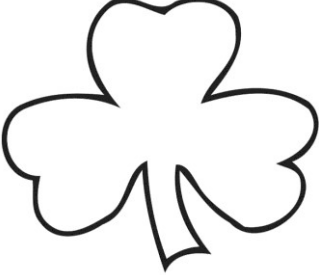
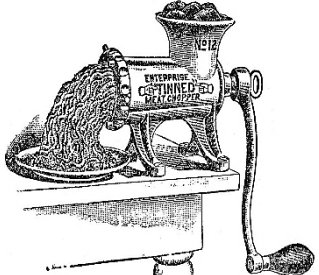

<p style="text-align: center;">Sommet</p> <p>« Un sommet est la partie la plus élevée de quelque chose »</p> <p>Par exemple : le sommet d'une montagne</p>	
<p style="text-align: center;">Cadeau</p> <p>« Un cadeau est un présent que l'on offre à quelqu'un pour lui faire plaisir »</p>	
<p style="text-align: center;">Planète</p> <p>« Une planète est un corps céleste qui gravite autour du Soleil ou d'une autre étoile »</p>	
<p style="text-align: center;">Mystère</p> <p>« Un mystère est quelque chose d'inconnu, d'explicable, d'incompréhensible »</p>	
<p style="text-align: center;">Marchand</p> <p>« Un marchand est un commerçant qui vend différents produits »</p>	

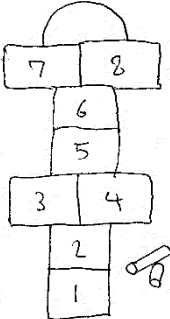



<p style="text-align: center;">Lardon</p> <p>« Un lardon est une petite pièce de viande, souvent du porc, qui sert à assaisonner certains plats »</p>	
<p style="text-align: center;">Labour</p> <p>« Le labour est une technique qui permet de retourner la terre dans un champ à l'aide d'une charrue »</p>	
<p style="text-align: center;">Charmeur</p> <p>« Un charmeur est une personne qui cherche à plaire, à fasciner ou à séduire »</p> <p>Par exemple : un charmeur de serpent</p>	
<p style="text-align: center;">Fiston</p> <p>« Un fiston désigne un fils ou un jeune garçon »</p>	
<p style="text-align: center;">Poivron</p> <p>« Un poivron est un piment doux qui peut être vert, jaune ou rouge »</p>	

<p>Chorale</p> <p>« Une chorale désigne un groupe de chanteurs qui unissent leur voix pour interpréter une pièce »</p>	
<p>Pingouin</p> <p>« Un pingouin est un oiseau marin au plumage noir et blanc qui vit en Arctique »</p>	
<p>Théière</p> <p>« Une théière est un récipient que l'on utilise pour faire infuser le thé et le servir »</p>	
<p>Chrétien</p> <p>« Un chrétien est une personne baptisée qui croit en la religion de Jésus-Christ »</p>	
<p>Tendance</p> <p>« Une tendance est une disposition particulière qui porte quelqu'un à être et à agir d'une certaine façon »</p> <p>Par exemple : la tendance mode</p>	

<p>Montre</p> <p>« Une montre est un cadran porté au poignet qui sert à indiquer l'heure »</p>	
<p>Région</p> <p>« Une région est un territoire ou une zone géographique située autour d'une ville »</p>	
<p>Docteur</p> <p>« Un docteur est une personne qui pratique la médecine »</p>	
<p>Troupeau</p> <p>« Un troupeau est un regroupement d'animaux vivant ensemble »</p>	
<p>Chasseur</p> <p>« Un chasseur est une personne qui poursuit des animaux pour les capturer »</p>	

<p>Secret</p> <p>« Un secret est quelque chose d'intime que l'on ne souhaite pas partager avec les autres »</p>	
<p>Colonne</p> <p>« Une colonne est un support vertical en forme de cylindre »</p>	
<p>Cahier</p> <p>« Un cahier est un ensemble formé de plusieurs feuilles de papier réunies, destiné à l'écriture »</p>	
<p>Assiette</p> <p>« Une assiette est une pièce de vaisselle dans laquelle on mange »</p>	
<p>Seconde</p> <p>« Une seconde est une unité de mesure du temps »</p>	
<p>Harpon</p> <p>« Un harpon est un outil composé de crochets qui sert à pêcher des poissons »</p>	

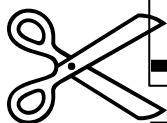
<p style="text-align: center;">Trèfle</p> <p>« Un trèfle est une plante dont la feuille est divisée en trois petites parties »</p>	
<p style="text-align: center;">Lourdeur</p> <p>« La lourdeur est le caractère de ce qui est difficile à soulever en raison de son poids élevé »</p>	
<p style="text-align: center;">Hachoir</p> <p>« Un hachoir est un appareil qui sert à couper finement la viande et d'autres aliments »</p>	
<p style="text-align: center;">Goudron</p> <p>« Le goudron est un produit fait à partir de pétrole utilisé pour le revêtement des routes »</p>	
<p style="text-align: center;">Oursin</p> <p>« Un oursin est un animal marin dont le corps est recouvert d'épines »</p>	

<p>Marelle</p> <p>« La marelle est un jeu d'enfants qui consiste à sauter à cloche-pied dans des cases dessinées au sol »</p>	
<p>Kiosque</p> <p>« Un kiosque est une petite boutique dans laquelle on vend généralement des journaux ou des fleurs »</p>	
<p>Rizière</p> <p>« Une rizière est un champ où l'on cultive le riz »</p>	
<p>Nourrice</p> <p>« Une nourrice est une femme qui garde de jeunes enfants »</p>	

ANNEXE G

AFFICHE DE RAPPEL POUR L'ALLOGRAPHE DE PRODUCTION AUX ÉTUDES 1
ET 2

minuscule








MAJUSCULE

ANNEXE H

CRITÈRES DE NOTATION POUR LE POURCENTAGE DE LETTRES CONFORMES AU MODÈLE ALLOGRAPHIQUE

- La lettre doit être reconnaissable en dehors du contexte;
- La lettre ne doit ressembler à aucune autre lettre ou à aucun chiffre;
- La lettre ne doit pas être inversée ou retournée;
- La lettre doit être complète (i et j avec le point, f et t avec la barre);
- La lettre doit avoir une queue si elle est requise (g, j, p, q, y);
- La lettre ne doit pas être barbouillée ou involontairement hachurée;
- Les lettres ne doivent pas être superposées les unes aux autres;
- Les lettres doivent être proportionnelles.

Exemples évocateurs :

	Lettre « q » : aucun crédit. La barre verticale ne descend pas suffisamment. Confusion possible avec la lettre « a ».
	Lettre « v » : aucun crédit. Présence d'une courbe et non d'une droite. Confusion possible avec la lettre « u ».
	Lettre « y » : aucun crédit. La barre verticale ne descend pas suffisamment. Confusion possible avec la lettre « u ».
	Lettre « h » : aucun crédit. La barre verticale ne monte pas suffisamment; présence d'une ouverture. Confusion possible avec la lettre « n ».
	Lettre « k » : aucun crédit. Confusion possible avec la lettre « r ».